

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2001-174615

(P2001-174615A)

(43)公開日 平成13年6月29日(2001.6.29)

(51) Int.Cl.⁷
G 0 2 B 5/18
G 0 3 F 7/20
H 0 1 L 21/027

識別記号

F I
G 0 2 B 5/18
G 0 3 F 7/20
H 0 1 L 21/30

テ-マコ-ト (参考)
2 H 0 4 9
5 F 0 4 6

審査請求 未請求 請求項の数13 Q1. (全 42 頁)

(21)出願番号	特願2000-35910(P2000-35910)
(22)出願日	平成12年2月14日(2000.2.14)
(31)優先権主張番号	特願平11-107747
(32)優先日	平成11年4月15日(1999.4.15)
(33)優先権主張国	日本(JP)
(31)優先権主張番号	特願平11-284498
(32)優先日	平成11年10月5日(1999.10.5)
(33)優先権主張国	日本(JP)

(71)出願人 000004112
株式会社ニコン
東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72)発明者 後藤 明弘
東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(74)代理人 100077919
弁理士 井上 義雄 (外1名)

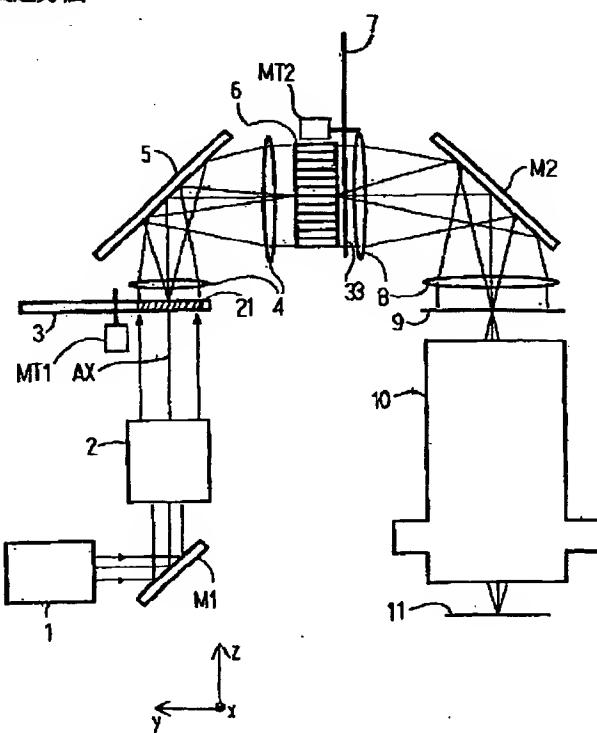
Fターム(参考) 2H049 AA03 AA04 AA31 AA33 AA37
AA48 AA60 AA63
5F046 BA03 CA04 CA05 CB01 CB02
CB05 CB12 CB13 CB23

(54) 【発明の名称】回折光学素子、該素子の製造方法、該素子を備える照明装置、投影露光装置、露光方法、及び光ホモジナイザー、該光ホモジナイザーの製造方法

(57) 【要約】

【課題】 入射光束を効率良く所定の断面形状を有する光束に変換する回折光学素子などを提供すること。

【解決手段】 入射光束を所定の断面形状の光束に変換する回折光学素子において、前記回折光学素子は複数の部分光学素子50から構成され、該複数の部分光学素子は該入射光束を夫々所定の部分光束に変換し、該部分光束の総和が前記所定の断面形状の光束に一致する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 入射光束を所定の断面形状の光束に変換する回折光学素子において、前記回折光学素子は複数の部分光学素子から構成され、該複数の部分光学素子は該入射光束を夫々所定の部分光束に変換し、該部分光束の総和が前記所定の断面形状の光束に一致することを特徴とする回折光学素子。

【請求項 2】 前記部分光学素子を複数個含み、1つの単位としたものを基本光学素子とし、該基本光学素子複数個によって構成されることを特徴とする請求項1記載の回折光学素子。

【請求項 3】 前記部分光学素子は、回転対称型レンズ成分の位相分布と、入射光を所定方向に偏向する回折格子の位相分布とを合成した位相分布に対応した形状を有することを特徴とする請求項2記載の回折光学素子。

【請求項 4】 少なくとも1個以上の基本光学素子と、該基本光学素子を構成する複数の部分光学素子とを備え、入射光束を所定の断面形状の光束に変換する回折光学素子の製造方法において、前記所定の断面形状を複数の部分領域に分割する工程と、前記複数の部分領域に対応する前記部分光学素子を稠密に配列する工程と、

前記稠密に配列された部分光学素子を新たな基本光学素子として、該新たな基本光学素子を少なくとも1個以上配置する工程とを備えることを特徴とする回折光学素子の製造方法。

【請求項 5】 所定のパターンが形成されたマスクを照明する照明装置において、光束を供給する光源部と、請求項1, 2又は3記載の回折光学素子を含む光束変換部と、

前記光束変換部により回折された光束に基づいて実質的な面光源を形成するオプティカルインテグレータと、前記オプティカルインテグレータからの光束を前記マスクへ導くコンテンサ光学系とを備え、

前記光束変換部は、前記所定面上における光強度分布を変更可能に構成されることを特徴とする照明装置。

【請求項 6】 前記マスクを支持する第1ステージと、前記マスクを照明する請求項5記載の照明装置と、被露光基板を保持する第2ステージと、前記照明装置により照明された前記マスクのパターンの像を前記被露光基板上に投影露光するための投影光学系とを備えることを特徴とする投影露光装置。

【請求項 7】 請求項5記載の照明装置により前記マスクを照明する工程と、該照明された前記マスクのパターンの像を感光性材料が塗布された被露光基板上に形成する工程とを含むことを特徴とする露光方法。

【請求項 8】 基板上にエッチングにより形成された複

数の基本光学素子を有する光ホモジナイザーであって、前記基本光学素子は所定面において照明する領域が少量化する複数の素子であることを特徴とする光ホモジナイザー。

【請求項 9】 基板上にエッチングにより形成された複数の基本光学素子を有する光ホモジナイザーであって、該複数の基本光学素子を、オプティカルインテグレータの構成により定まる干渉ノイズパターンの強調周期からずれるように配置したことを特徴とする光ホモジナイザ。

【請求項 10】 基本光学素子のパターンが描画されたレチクルを製作する工程と、基板上にフォトレジストを塗布する工程と、前記パターンを縮小投影レンズ系を介して前記基板上に縮小露光する工程と、前記基板の位置をシフトさせ、前記パターンを縮小露光する工程を繰返すことにより基本光学素子の潜像をアレイ状に生成する工程と、前記潜像を現像し、エッチングする工程とからなる光ホモジナイザーの製造方法において、前記レチクルは、複数の基本光学素子の複数のパターンを含むことを特徴とする光ホモジナイザーの製造方法。

【請求項 11】 基本光学素子のパターンが描画されたレチクルを製作する工程と、基板上にフォトレジストを塗布する工程と、前記パターンを縮小投影レンズ系を介して前記基板上に縮小露光する工程と、前記基板の位置をシフトさせ、前記パターンを縮小露光する工程を繰返すことにより基本光学素子の潜像をアレイ状に生成する工程と、前記潜像を現像し、エッチングする工程とからなる光ホモジナイザーの製造方法において、前記レチクルに、前記パターンを電子ビームを用いて描画する工程をさらに有することを特徴とする光ホモジナイザーの製造方法。

【請求項 12】 基本光学素子のパターンが描画されたレチクルを製作する工程と、基板上にフォトレジストを塗布する工程と、前記パターンを縮小投影レンズ系を介して前記基板上に縮小露光する工程と、前記基板の位置をシフトさせ、前記パターンを縮小露光する工程を繰返すことにより基本光学素子の潜像をアレイ状に生成する工程と、前記潜像を現像し、エッチングする工程とからなる光ホモジナイザーの製造方法において、前記レチクルに、電子ビーム描画によって製造した原盤を投影露光することによりパターンを描画することを特徴とする光ホモジナイザーの製造方法。

【請求項 13】 マスクを支持する第1ステージと、請求項8又は9記載の光ホモジナイザー又は請求項10, 11, 12記載の製造方法によって製造された光ホモジナイザーを有し、前記マスクを照明する照明装置と、被露光基板を保持する第2ステージと、前記照明装置により照明された前記マスクのパターンの像を前記被露光基板上に投影露光するための投影光学系

とを備えることを特徴とする投影露光装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、回折光学素子との製造方法、および該回折光学素子を備える照明装置と投影露光装置、さらに、露光方法に関し、特に半導体集積回路又は液晶デバイス等のためのマスクパターンを照明する装置、及び該照明装置に好適な投影露光装置並びに該照明装置を用いる露光方法に関する。

【0002】

【従来の技術】半導体素子等の回路パターン形成には、一般にフォトリソグラフィ技術と呼ばれる工程が必要である。この工程には通常、レチクル（マスク）パターンを半導体ウエハ等の基板上に転写する方法が採用される。基板上には感光性のフォトレジストが塗布されており、照射光像、即ち、レチクルパターンの透明部分のパターン形状に応じて、フォトレジストに回路パターンが転写される。そして、投影露光装置では、レチクル上に描画された転写すべき回路パターンの像が、投影光学系を介して基板（ウエハ）上に投影、露光される。かかる投影露光装置では、レチクルを照明するための照明光学系中に、フライアイレンズ等のオプティカルインテグレータが使用されており、レチクル上に照射される照明光の強度分布を均一化している。フライアイレンズ等のオプティカルインテグレータを用いる事で、レチクル上に照射される照明光の強度分布が均一化される理由を以下に述べる。

【0003】図27（a）はフライアイレンズを用いた投影露光装置の光学系の模式図である。光源（KrFエキシマレーザ）100を発した光束は、ビームエキスパンダ光学系101、振動ミラー102を介して、フライアイレンズ103に導かれる。そして、フライアイレンズを射出した光は、開口絞りを透過後、コンデンサレンズ104を介してレチクル105を照明する。ここで、フライアイレンズ103を構成する各々のレンズの入射面と、レチクル面105はそれぞれ共役である為、結果として、フライアイレンズに入射した光束は、フライアイレンズの要素レンズ単位で分割され、レチクル面上で重ね合わされる。この為、フライアイレンズ入射面にて例えばガウス分布状の明暗差の大きい分布があったとしても、フライアイレンズの要素レンズ単位ではさほど大きな分布にはならず、さらにそれが重なり合う事で平均化され、レチクル面105上では極めて均一性の高い照度分布が得られる。

【0004】さて、波面分割及びその重ねあわせという過程を2回繰り返すシステムが従来から知られており、以下このシステムをダブルフライアイレンズシステムという。ダブルフライアイレンズを用いた従来の投影露光装置の光学系の一例を、図27（b）に示す。エキシマレーザなどの光源201からの光束は、エキスパンダー

202を通して光束の断面形状を任意の形状に変換された後、ミラー203及び光束の偏光を緩和する為の水晶プリズム204を介して複数の光学要素からなる第1フライアイレンズ（2次光源手段）205に入射し、その射出側面に多数の2次光源像を形成する。該多数の2次光源から発散する光束はリレーレンズ206により集光され、第2フライアイレンズ207の入射面を重疊的に均一照明する。その結果、第2フライアイレンズ207の射出面に、第1フライアイレンズのレンズ要素数と第2フライアイレンズのレンズ要素数の積に相当する数の多数の3次光源像を形成することができる。そして、3次光源からの光束は、絞り208によりその径を制限され、コンデンサーレンズ群209、211により集光され、投影露光されるパターンが描画されたレチクル又はマスクパターン213を重疊的に均一照明する。ここで、コンデンサーレンズ群209、211中には照明範囲を決定するための視野絞り210が配置されている。そして、均一照明された照明光にもとづき、レチクル又はマスクパターン213上に形成されたパターンは投影レンズ214を介して被露光物体である基板215上に投影される。

【0005】ダブルフライアイレンズと呼ばれるシステムの、通常の一つだけフライアイレンズを用いるシステムに対する特徴は、以下の通りである。なお、以下では記述を容易にする為、通常の一つだけフライアイレンズを用いるシステムをシングルフライアイレンズシステムと称する。

【0006】（1）レチクルを照明する照明光の照度を均一にする効果については、フライアイレンズの分割数が増えれば増えるほどその効果を増すが、フライアイレンズの製造費用はフライアイレンズの分割数におおよそ比例する。このため、シングルフライアイレンズシステムで多くの波面分割を実現しようとすると、レンズの製造費用が莫大なものとなってしまう。しかし、ダブルフライアイレンズシステムでは、実効的に第1と第2のフライアイレンズの分割数の積が、その光学系の総合分割数となる為、製造コストをかけずに高性能な照明系を得る事が出来るという利点がある。例えば、第1フライアイレンズが100分割、第2フライアイレンズが100分割とすると、100分割のレンズ2個分の製造コストで10000 (=100×100) 分割と等価の照明系が得られる。

【0007】（2）シングルフライアイレンズでは、フライアイレンズ入射面の光分布がそのままフライアイレンズに入射する。従って、光源の振動等で該光分布が変化すると投影露光装置の空間的コヒーレンシーが変化してしまい好ましくない。しかし、ダブルフライアイレンズシステムでは第2フライアイレンズの入射面の光分布は、一度第1フライアイレンズにより均一化を行ったものであるため、光源が振動等してもその光分布は殆ど変

化しない。このため、光源部に振動等が生じても結像性能に影響を与えるにくいという利点を有する。

【0008】(3) さらに、ダブルフライアイレンズシステムは、開口絞りを交換した時の照度均一性の崩れ量、即ち、理想的ケーラー照明状態からの変化量が少ないという利点も有している。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】さて、近年、これらの露光装置に要求される解像力等の性能は、理論的に算出される限界に極めて近付いている。一般に良く知られているように、レチクルのパターンにより、最適な光学系の定数（投影レンズの開口数、照明系の開口数等）の設定値は異なるが、装置能力の理論的限界付近で露光が行なわれている関係上、当然の事ながら装置側には、マスクのパターンに合わせて最適な光学系の定数が選択出来る事が求められる。

【0010】このことを照明系について見ると、少なくとも照明系の開口数が可変である事が必要となる。本発明が取り扱う、図27(B)に示した様なダブルフライアイレンズシステムにおいて、開口数を可変にする為には、開口絞り208の径をカメラの絞りの如く可変絞りにする、又は絞りを切り替え可能として対応するのが一般的である。ただし、単に絞り径を切り替えただけでは、絞り径を小さなものに変更した場合、光束を遮光する面積が大きくなり、照度が低下してしまう。

【0011】この種の露光装置において照度が低下する事は、スループットの低下を意味し、その結果、製造した製品の原価を跳ね上げることになる。製品のうち、特にメモリーについては製品一個当たりの利幅が極端に少ない為、半導体等の製造業界において製造原価は特に重要な項目である。この為、露光装置の種々の仕様の中でも「照度」は重要な項目の一つとなっており、照度低下は極力避ける必要がある。

【0012】ダブルフライアイレンズシステムでは、照度低下対策として、第1フライアイレンズを焦点距離が異なるレンズに、絞りと共に切り替える方式が提案されている。例えば、開口絞り径を小さくする場合には、第1フライアイレンズを焦点距離の長いものに切り替える。このようにすれば、第2フライアイレンズ入射面の中央近傍に光束が集まるので、開口絞り径が小さくても、殆ど照度が低下する事がない。

【0013】この様に、開口絞り径が変わるだけあれば、第1フライアイレンズの焦点距離を切り替えるだけで、照度低下を押さえる事ができる。しかし、近年では、開口絞りとして円形以外の絞りを用いる場合がある。例えば、図28に示す様な輪帯状の絞りや、図29に示す様な複数開口の絞りである。

【0014】図28及び図29の開口絞りについて、簡単に解説する。レチクルのパターンが微細になり、装置の解像限界付近にて露光がおこなわれるようになると、

照明系の開口絞りから発した光束のうち、解像に寄与するのは、開口絞りの周辺部から発した光のみになり、開口の中央部から発した光は像のコントラストを下げるだけの働きしか持たなくなる。換言すると、レチクルの情報をウエハに伝達する際、情報伝達のエネルギーを与えるのは開口絞りの周辺部から発した光のみであり、開口の中央部から発した光はいわばノイズを発生するだけになってしまうという事になる。従って、開口絞り中央部からは光を発しないほうが望ましいといえる。この様な発想から、図28の様な絞りが考案された。図29に示す絞りは、更に解像するパターンを縦方向のラインと横方向のラインのみに限定した場合の絞りである。この場合は、更に、開口絞りの上下、左右も更に遮光する図29に示す様な絞りが考案された。

【0015】この様な円形開口でない開口の場合、フライアイレンズの透過光量の一部分のみを使用し、光軸近辺の中央部分を含む多くの部分で変形開口絞りにより遮光されてしまうので光量の損失を招き、レチクル面での照度が低下するため、スループットが低減してしまうという問題がある。

【0016】本発明は上記問題に鑑みてなされたものであり、入射光束を効率良く所定の断面形状を有する光束に変換する回折光学素子とその製造方法を提供することを目的とする。また、この回折光学素子を備え、所定面において種々の光強度分布を形成できる照明装置、該照明装置に好適な投影露光装置、並びに該投影露光装置を用いた露光方法を提供することを他の目的とする。

【0017】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するためには、本発明は、入射光束を所定の断面形状の光束に変換する回折光学素子において、前記回折光学素子は複数の部分光学素子から構成され、該複数の部分光学素子は該入射光束を夫々所定の部分光束に変換し、該部分光束の総和が前記所定の断面形状の光束に一致することを特徴とする回折光学素子を提供する。

【0018】また、本発明は、前記部分光学素子を複数個含み、1つの単位としたものを基本光学素子とし、該基本光学素子複数個によって構成されることが望ましい。さらに、前記部分光学素子は、回転対称型レンズ成分の位相分布と、入射光を所定方向に偏向する回折格子の位相分布とを合成した位相分布に対応した形状を有することが望ましい。

【0019】また、本発明は、少なくとも1個以上の基本光学素子と、該各基本光学素子を構成する複数の部分光学素子とを備え、入射光束を所定の断面形状の光束に変換する回折光学素子の製造方法において、前記所定の断面形状を複数の部分領域に分割する工程と、前記複数の部分領域に対応する前記部分光学素子を稠密に配列する工程と、前記稠密に配列された部分光学素子を新たに

基本光学素子として、該新たな基本光学素子を少なくとも1個以上配置する工程とを備えることを特徴とする回折光学素子の製造方法を提供する。

【0020】また、本発明は、所定のパターンが形成されたマスクを照明する照明装置において、光束を供給する光源部と、請求項1、2又は3記載の回折光学素子を含む光束変換部と、前記光束変換部により回折された光束に基づいて実質的な面光源を形成するオプティカルインテグレータと、前記オプティカルインテグレータからの光束を前記マスクへ導くコンデンサ光学系とを備え、前記光束変換部は、前記所定面上における光強度分布を変更可能に構成されることを特徴とする照明装置を提供する。

【0021】また、本発明は、前記マスクを支持する第1ステージと、前記マスクを照明する請求項5記載の照明装置と、被露光基板を保持する第2ステージと、前記照明装置により照明された前記マスクのパターンの像を前記被露光基板上に投影露光するための投影光学系とを備えることを特徴とする投影露光装置を提供する。

【0022】また、本発明は、請求項5記載の照明装置により前記マスクを照明する工程と、該照明された前記マスクのパターンの像を感光性材料が塗布された被露光基板上に形成する工程とを含むことを特徴とする露光方法を提供する。また、本発明は、基板上にエッティングにより形成された複数の基本光学素子を有する光ホモジナイザーであって、前記基本光学素子は所定面において照明する領域が少量ずつ異なる複数の素子であることを特徴とする光ホモジナイザーを提供する。光ホモジナイザーとは、回折素子に限定されず、屈折型素子、回折素子と屈折型素子との複合型素子などを含む光強度均一化素子である。ここで、照明する領域をずらす量は、フレネル回折によるノイズパターン又は基本光学素子の製造誤差に起因するノイズパターンの強度分布の山と谷とが互いに埋め合う関係を満足するような量であることが好ましい。また、基板は通常、ガラス基板であるが、波長が短かくなると蛍石基板の使用が好ましい。これにより、光束が基本光学素子を透過後、オプティカルインテグレータの入射面上に発生する干渉ノイズを平均化することができる。この結果、オプティカルインテグレータ入射面上での照明均一度が向上し、最終的にレチクル面（ウエハ面）での照明均一度が向上する。また、本発明は、基板上にエッティングにより形成された複数の基本光学素子を有する光ホモジナイザーであって、該複数の基本光学素子を、オプティカルインテグレータの配置により定まる干渉ノイズパターンの強調周期からずれるように配置したことを特徴とする光ホモジナイザーを提供する。これにより、オプティカルインテグレータの作る干渉ノイズを効率良く平均化することができる。この結果、より高い照明均一度を得ることができる。従来技術ではエッティングによる光ホモジナイザーの位置には第一フライ

アイアレイが配置されており、第一フライアイアレイの要素レンズ（すなわち基本光学素子）の配列精度は要素レンズの外径公差で決まっていた。このため、ランダム平均効果を得られていた。これに対して、エッティングによる光ホモジナイザーでは基本光学素子の配列の精度は格段に高い。したがって、ランダム平均より効果の高い規則的平均を行うことができる。なお、この効果は回折型素子によらず、エッティングにより製造した屈折型の光ホモジナイザーにも効果がある。また、本発明は、基本光学素子のパターンが描画されたレチクルを製作する工程と、基板上にフォトレジストを塗布する工程と、前記パターンを縮小投影レンズ系を介して前記基板上に縮小露光する工程と、前記基板の位置をシフトさせ、前記パターンを縮小露光する工程を繰返すことにより基本光学素子の潜像をアレイ状に生成する工程と、前記潜像を現像し、エッティングする工程とからなる光ホモジナイザーの製造方法において、前記レチクルは、複数の基本光学素子の複数のパターンを含むことを特徴とする光ホモジナイザーの製造方法を提供する。これにより、プロキシミティによる方法に比較して、パターンの分解能を向上することができる。この結果、製造誤差の少ないバーニングが可能となり、光ホモジナイザーの透過効率や、照明均一度がより向上する。また、一括露光方式でないため請求項9に記載したような基本光学素子をシフトした配置が可能となり、干渉ノイズ低減効果の高い光ホモジナイザーを製造できる。さらに、レチクルにあらかじめ複数の部分光学素子のパターンを描画しておくことで、光ホモジナイザー製造に必要な露光回数を低減できる。これにより、光ホモジナイザーを製造するスループットが向上し、光ホモジナイザーのコストダウンを行うことができる。また、該複数の基本パターン描画時に発生する描画誤差はそれぞれ異なり、かつ最終的には各素子は並列に使用されるので、レチクル描画誤差が相殺される効果がある。すなわち光ホモジナイザーとしての照明均一度がより向上する。また、本発明は、基本光学素子のパターンが描画されたレチクルを製作する工程と、基板上にフォトレジストを塗布する工程と、前記パターンを縮小投影レンズ系を介して前記基板上に縮小露光する工程と、前記基板の位置をシフトさせ、前記パターンを縮小露光する工程を繰返すことにより基本光学素子の潜像をアレイ状に生成する工程と、前記潜像を現像し、エッティングする工程とからなる光ホモジナイザーの製造方法において、前記レチクルに、前記パターンを電子ビームを用いて描画する工程をさらに有することを特徴とする光ホモジナイザーの製造方法を提供する。これにより、電子ビーム描画によって製造するので、バーニングが高精度に行える。この結果、製造誤差の少ないバーニングが可能となり、光ホモジナイザーの透過効率や、照明均一度がより向上する。また、本発明は、基本光学素子のパターンが描画されたレチクルを製作する工

程と、基板上にフォトレジストを塗布する工程と、前記パターンを縮小投影レンズ系を介して前記基板上に縮小露光する工程と、前記基板の位置をシフトさせ、前記パターンを縮小露光する工程を繰返し、基本光学素子の潜像をアレイ状に生成する工程と、前記潜像を現像し、エッ칭する工程とからなる光ホモジナイザーの製造方法において、前記レチクルに、電子ビーム描画によって製造した原盤を投影露光することによりパターンを描画することを特徴とする光ホモジナイザーの製造方法を提供する。これにより、バターニングが高精度に行える。この結果、製造誤差の少ないバターニングが可能となり、光ホモジナイザーの透過効率や、照明均一度がより向上する。また、EB描画された原盤を複数回露光してレチクルを製造しておけば、光ホモジナイザー製造に必要な最終段の露光回数を低減できる。すなわち光ホモジナイザー製造のスループットが向上し、光ホモジナイザーのコストダウンが行える。また、本発明は、マスクを保持する第1ステージと、請求項8又は9記載の光ホモジナイザー又は請求項10, 11, 12記載の製造方法によって製造された光ホモジナイザーを有し、前記マスクを照明する照明装置と、被露光基板を保持する第2ステージと、前記照明装置により照明された前記マスクのパターンの像を前記被露光基板上に投影露光するための投影光学系とを備えることを特徴とする投影露光装置を提供する。

【0023】

【発明の実施の形態】以下、添付図面に基づいて本発明の実施の形態について説明する。

【0024】(第1実施形態) 図1は本発明の第1実施形態にかかる投影露光装置の構成を示す図である。エキシマレーザ1からの光束は、反射ミラーM1で光路を折り曲げられ、ビーム整形光学系2により所望の断面形状を有する光束に変換され、レボルバ3に設けられている回折光学素子21に入射し、その射出面近傍に所望の2次光源列を形成する。次に、リレーレンズ4と振動ミラー5とを介して、フライアイ・インテグレータ6の入射面を所望の光強度分布で重疊的に均一照明する。その結果、フライアイ・インテグレータ6の各要素レンズの射出面に3次光源である実質的な面光源を形成する。該面光源を発した光束は、レボルバ7に設けられている開口絞り33により通過光束の形状を制限された後、コンデンサーレンズ群8、反射ミラーM2を介して集光される。そして、パターンが描画されたレチクル又はマスクパターン9を重疊的に均一照明する。均一照明された照明光に基づき、投影レンズ10がレチクル又はマスク9上に形成されたパターンをウエハ11上に投影露光する。なお、1回の露光はレーザの数十パルスの露光の合成によって行われ、露光時間にわたって振動ミラー5の角度を変化させ、フライアイ・インテグレータ6等によって発生する干渉ノイズを平均化している。

【0025】ここで、リレーレンズ4とフライアイ・インテグレータ6との合成レンズ系は結像光学系となっており、回折光学素子21の射出面近傍の2次光源列のx-y平面内の有効径全体が、フライアイ・インテグレータ6の各要素レンズの射出面近傍に3次光源列として結像する構成である。

【0026】また、レボルバ3には、図2(A)に示すように回折光学素子21, 22, 23, 24と補助フライアイ・インテグレータ25, 26とが設けられている。そして、モータMT1により光軸AXを中心としてレボルバ3を回転する事で、回折光学素子及び補助フライアイ・インテグレータの中から任意の一つを選択的に切り替え可能な構成である。また、開口絞り31～36も同様に、図2(B)に示すように、種々の開口形状を有する絞りがレボルバ7により選択的に切り換え可能な構成である。

【0027】レボルバ3を回転することで、補助フライアイ・インテグレータ25又は26を選択した時は、上述したようにフライアイ・インテグレータ6の射出面に、補助フライアイ・インテグレータのレンズ要素数mとフライアイ・インテグレータ6のレンズ要素数nの積m×nに相当する数の多数の3次光源像を形成することができるダブルフライアイレンズシステムとなる。ここで、補助フライアイ・インテグレータ25は開口絞り32に対応し、同様にフライアイ・インテグレータ26は絞り34にそれぞれ対応している。従来技術においても、本実施形態の補助フライアイ・インテグレータに対応する第1フライアイ・インテグレータを切り換えて、径の小さい開口絞りに対応させることは行われている。

【0028】これに対して、本実施形態の特徴の一つは、この従来技術の第1フライアイ・インテグレータ(本実施形態では補助フライアイ・インテグレータ)を切り換える選択肢を増やして、後述する構成を有する第1から第4の回折格子21, 22, 23, 24をも選択できるように構成されていることである。

【0029】回折光学素子21～24は、それぞれ開口絞り33, 35, 36, 31に対応している。

【0030】これら回折光学素子について、回折光学素子21を代表例にとって説明する。図3は回折光学素子21の基本概念を説明する図である。回折光学素子21は、複数の基本光学素子40から構成され、さらに、各基本光学素子40は複数の部分光学素子41から構成されている。各基本光学素子40は同じ部分光学素子41を有し、基本光学素子40を行列状に繰返して配置したものが、回折光学素子21の全有効径に対応する。なお、基本光学素子のx又はy方向の有効径と回折光学素子21の有効径とが一致するような配置も勿論可能である。

【0031】次に、図4に基づいて基本光学素子40が入射した光を重疊させる機能、いわゆるインテグレート

機能について説明する。なお、簡単のためリレーレンズ4は模式的に単レンズで示してある。不均一な強度分布を有する光43が、基本光学素子40A, 40B, 40Cに図4に示すように入射する場合を考える。入射光束43は、基本光学素子40A~40Cの3つの各領域に切断された後、フライアイ・インテグレータ6の所定の同じ位置にこの3つの領域からの光束が重ね合わされる。このため、フライアイ・インテグレータ6の入射面上では、強度分布の平均効果が得られる。図4の例では、各基本光学素子40A~40Cに入射した光束が、フライアイ・インテグレータ6の入射面上に輪帯形状の強度分布42を形成している。従って、回折光学素子21に不均一な強度分布を有する光束43が入射した場合でも、回折光学素子21の光インテグレート機能により所定のほぼ均一な強度分布の光を得ることができる。また、輪帯状強度分布を有する光束は、フライアイ・インテグレータ6によってさらに分割された後にレチクル面上で重ね合わされるので、ダブルフライアイレンズシステムの効果を得ることができる。

【0032】次に、回折光学素子21を使用することで光量の損失を低減できる原理について説明する。まず、1個の基本光学素子40が、フライアイ・インテグレータ6の入射面上に形成する照明領域の形状を説明する。図5はフライアイ・インテグレータ6の入射面のx-y断面を示し、フライアイ・インテグレータ6を構成する要素レンズ44の1つを斜線部分で示す。ここで、フライアイ・インテグレータ6は、 $10 \times 10 = 100$ 個の要素レンズから構成されている。また、フライアイ・インテグレータ6の射出面に配置されている輪帯開口絞り33を点線で示す。そして、1つの基本光学素子40によって、フライアイ・インテグレータ6の入射面上の太線で示す基本照明領域45が照明される。ここで、各要素レンズ44の入射面はレチクル面の露光領域と共に役であるため、輪帯絞り33の開口部分と要素レンズの射出面に形成された3次光源列の領域とが重なる位置に存在する要素レンズは全て照明される必要がある。このため、開口絞りは輪帯形状でも照明領域は図5に示す基本照明領域45のような形状となる。

【0033】また、基本照明領域45は、さらに複数の部分照明領域46に分割することができる。図6に基づいて、部分光学素子41と部分照明領域46との関係を説明する。図6において、部分照明領域46はフライアイ要素レンズ44と同じ形状である場合を考える。この場合、基本照明領域45は68個の部分領域に分割されることになる。さて、本実施形態では1つの部分光学素子が1つの部分照明領域46を照明する。そして、後述するように基本光学素子40に含まれる全ての部分光学素子41による照明領域を合成した領域と基本照明領域45とを一致させるように設計することができる。

【0034】そして、基本光学素子40どうしは相互に

隙間がない状態（以下「稠密状態」という。）に配列され、回折光学素子21を構成している。従って、回折光学素子21の有効径を照明すると、入射光は各基本光学素子41によって光量の損失なくフライアイ・インテグレータ6の入射面で基本照明領域45の形状に変換され、且つこれらが当該入射面上で重畠される。換言すると、回折光学素子21は光源からの入射光量を損失することなく、輪帯照明に必要な基本照明領域45を照明でき、且つ上述したように光インテグレート効果を有する。

【0035】次に、稠密状態に配列された基本光学素子からなる回折光学素子の設計手順について説明する。ここでは、回折光学素子に対応する仮想回折レンズを想定し、この仮想回折レンズを部分光学素子に分割するという手順をとる。ここでは、図2(B)に示す輪帯開口絞り33を照明するための回折光学素子21を設計する場合を例として説明する。

【0036】図7に示すように、仮想回折レンズ47は回折光学素子21の面に想定する。そして、仮想回折レンズ47の焦点距離を f_{uni} 、リレーレンズ4の焦点距離を f_L とそれぞれしたとき、仮想回折レンズ7とリレーレンズ4とは $f_{uni} + f_L$ の間隔で配置し、両レンズの合成系は結像光学系となっている。なお、簡単のため、リレーレンズ4は模式的に単レンズで表している。フライアイ・インテグレータ6の入射面上の基本照明領域45を、この結像光学系を介して仮想回折レンズ側の結像面に投影したものを投影基本領域48とする。即ち、仮想回折レンズ47はフライアイ・インテグレータ6上の基本照明領域45を照明するので、基本光学素子40と同等の働きを有する。また、基本照明領域と同様に、部分照明領域も投影部分領域49と対応する。ここで、仮想回折レンズ47に入射する光束は略平行光であるので部分投影領域49に対応する各光束はそのまま直進して仮想回折レンズ47に入射する。そして、仮想回折レンズ上において、部分投影領域49の各光束が入射する領域を部分光学素子50と考える。この結果、図6に示したフライアイ・インテグレータ6上の部分照明領域46のパターンが所定の相似比で仮想回折レンズ上に投影されるので、投影された部分照明領域のパターンが仮想回折レンズの部分光学素子と対応する。ただし、輪帯照明に必要な部分光学素子は部分照明領域46と対応する68個の部分（図6の斜線部分）であり、中央部や周辺部の部分光学素子は不必要的部分である。

【0037】輪帯照明に不必要的部分光学素子を取り除いて、必要な部分光学素子のみ選択し、且つ効率よく照明できるように選択された部分光学素子を稠密状態に配列し直したもの、即ち、再配列したものを新たな基本光学素子51とする。

【0038】部分光学素子50を再配列する手順を図8に基づいて説明する。図8(a)は再配列する前の仮想

回折レンズ上の部分光学素子の構成、図8 (b) は再配列した後の部分光学素子の構成をそれぞれ示す図である。そして、図8 (a) に示すように、輪帯照明に必要な68個の部分光学素子50を、図中においてG1～G20の番号を付した20個のグループに分割する。例えば、番号1のグループは3個の部分光学素子50で構成されている。図8 (a) に示す構成のままで、G1～G20までのグループは略輪帯状に配置されているが、これらの各グループを図8 (b) に示すように矩形状に再配列する。そして、輪帯照明に必要な68個の部分光学素子50のみからなるグループを再配列するので、輪帯照明に使用しない部分光学素子を取り除くことになる。図8 (b) に示すような再配列後の長方形形状の素子が新たな基本光学素子51となる。図8 (b) からも明らかのように、x方向に34個の部分光学素子50を有する列を、y方向に2列配置した長方形形状となる。なお、各部分光学素子50は仮想回折レンズ47を分割したものであるので各部分光学素子の焦点距離はfsubbで全て等しく、且つfsubbは仮想回折レンズの焦点距離funiと等しい。

【0039】ここで、図8 (a) に示すように2～3個の部分光学素子50を1つのグループとして、全部で20のグループG1～G20に分類したとき、各グループ内の部分光学素子50は、もともと隣り合う部分光学素子どうしで構成されているので、その回折パターンは連続している。この場合には、各グループ単位を新たな部分光学素子と捉えて、パターンニング(再配列)することもできる。さらに、図8 (b) の構成において、グループG1とG11、又はG10とG20等も一連のパターンと考えることもできる。また、再配列する場合には、再配列する前の光軸Fについて対称的な位置関係にあるグループどうしは、再配列した後も所定点を中心に対称的な位置関係になるような構成としている。即ち、グループG1～G5と、G6～G10と、G11～G15と、G16～G20との4つの組どうしは、再配列前に光軸Fに関して対称的であるので、再配列後においても基本光学素子51の中央の点F'に関して対称となるようにこれらのグループを配置している。このような配置構成とすることで、最終的にフライアイ・インテグレータ6の射出面に生成される光点群(3次光源)を等分化することができる。また、光源の干渉性が高い場合には、最終的な照明領域において隣接し、且つ一部が重複するようなグループどうし、例えばG11とG20とを入換えるなどして、引き離して再配列することが望ましい。この場合には光軸対称性が必ずしも保証されないけれども、できる限り光軸に関して対称に配置することが望ましい。

【0040】そして、長方形形状の新たな基本光学素子51を、図9に示すように複数繰返して配置することにより回折光学素子21を構成する。図9の例では、図8

(b) の基本光学素子51をy方向に17個繰り返し配列し、合計で34個×34個の部分光学素子50から構成される正方形領域を構成している。

【0041】図10は、再配列の他の構成を示す図である。x方向にグループG1～G10を長方形形状にならべたものを1つの組として、この組をy方向に17回繰返して配列している。そして、グループG11～G20を長方形形状にならべたものを他の組として、グループG1～G10の組に続けて、当該他の組をy方向に17回繰返して配置する。結果として、34個×34個の部分光学素子を有する回折光学素子となる。さらに好ましくは、かかる回折光学素子は、y方向については光源であるエキシマレーザからの光束の断面形状がガウス強度分布となるようにアライメントし、x方向についてはトップハット型となるようにアライメントすることが望ましい。また、ガウス強度分布のピーク位置は、グループG1～G10の組とグループG11～G20の組との境界線BBの位置と略一致させることが望ましい。

【0042】また、以上の説明では、輪帯照明に必要最小限の領域を基本照明領域としたが、かかる領域についてさらに内側マージンと外側マージンとを設けても良い。図11は、基本照明領域45に点線で示すマージンを持たせた場合である。このように、必要最小限の領域に加えて、余裕を持たせた領域を基本照明領域とすることによって、基本照明領域とフライアイ・インテグレータ6との相対的なアライメントのずれの許容量を大きくすることができるので、アライメントが容易となる。また、光の強度分布の均一性があまり良くない周辺部分を使用しないため、レチクル面の強度分布の均一性を向上させることができる。マージンを持たせた基本照明領域の場合でも、上述した手順と同様に、点線で示す基本照明領域を部分照明領域に分割し、対応する仮想回折レンズを設定して、部分光学素子を定める。次に、この部分光学素子を稠密状態に再配列することで新たな基本光学素子を構成する。そして、新たな基本光学素子を複数配列して回折光学素子を構成する。

【0043】以上説明したように、再配列された稠密状態の回折光学素子21は、図9に示す構成には限られず、回折光学素子21の射出面において概略均一に2次光源列を形成するような配置であれば他の構成でも良い。さらに好ましくは、回折光学素子21内の最終的な部分光学素子の配列は、2次光源列が回折光学素子の中心軸に対称で、かつ回折光学素子21の有効径面内でなるべく均一に分布するように再配列することが望ましい。かかる再配列のためには、一般に知られている種々の最適化アルゴリズムを応用することできる。最適化における評価関数(メリット・ファンクション)としては、フライアイ・インテグレータの要素レンズの入射面における光強度の均一性と、射出面における光強度の均一性との2つを用いることができる。なお、以上で述べ

た最適化は本第1実施形態に限らず、以下で述べる第2～第6の実施形態や4極照明の場合にも適用することができる。この最適化は本発明による回折光学素子を用いた任意の照明形態の場合について適用可能である。

【0044】次に、部分光学素子の有効径と焦点距離とを決める手順を説明する。部分光学素子50の有効径 ϕ_{sub} は次式で与えられる。

【0045】

【数1】(1) $\phi_{sub} = \phi_{DOE} / k$

ここで、 ϕ_{DOE} は回折光学素子21の全有効径、 k は部分光学素子の数である。

【0046】また、焦点距離 f_{sub} を定めるに前に、リレーレンズの焦点距離 f_L を決定する必要がある。図12(a)に示すように、本実施形態では、回折光学素子21に入射する整形されたビームは、回折光学素子の有効径 ϕ_{DOE} とほぼ等しいビーム径 ϕ_B を有する。そして、回折光学素子21の近傍に2次光源面52(有効径 ϕ_{2nd})が形成され、該2次光源がフライアイ要素レンズの射出面近傍に3次光源面53(有効径 ϕ_{3rd})として結像される。

【0047】かかる結像関係から、次式に基づいてリレーレンズの焦点距離 f_L を求めることができる。

【0048】

【数2】(2) $f_L = \phi_{2nd} / \phi_{3rd} \cdot f_{FE}$

ここで、 f_{FE} はフライアイ要素レンズの焦点距離を表している。フライアイ要素レンズの焦点距離 f_{FE} と径 ϕ_{FE} とは、露光領域や光学系の全長の制限からおよその値が定まる。従って、充填率($= \phi_{3rd} / \phi_{FE}$)を所望の値に設定すると、 ϕ_{3rd} が定まる。また、 ϕ_{2nd} は回折光学素子21の配列と式(1)で求めた ϕ_{sub} とから定まる。これにより式(2)の右辺が定まるので f_L が求められる。

【0049】ここで、 ϕ_{2nd} を決定する手順を説明する。例えば、図8、9で説明したように稠密状態に再配列した回折光学素子21場合について ϕ_{2nd} を決定する手順を述べる。まず、部分光学素子の有効径 ϕ_{sub} は既に定まっているものとする。基本光学素子51は、図7の仮想回折レンズの中空部(使用しない部分光学素子部)を埋めるように稠密状態に再配列されているので、仮想回折レンズの焦点も分割・再配列される。この結果、部分光学素子の再配列に伴って、焦点は複数の光点群となる。従って、再配列に起因して生じたこれら光点群を含む領域を2次光源面の有効径 ϕ_{2nd} とする必要がある。

【0050】図8(a)に示すようにx-y面内における各部分光学素子の有効径内の重心位置と、焦点位置(図8(a)中央の点F)とは一致していない。例えばグループG1の最左端の部分光学素子A1、グループG5の右端の部分光学素子A2およびグループG15の右端の部分光学素子A3に入射した光線は図8(a)の矢

印で示す方向へ集光する。

【0051】部分光学素子A1、A2又はA3の重心位置と点Fとの位置の差を座標偏差(Δx 、 Δy)として、以下のように表すことができる。

【0052】グループG1の左端の部分光学素子A1については、

$(\Delta x, \Delta y) = (4.5 \phi_{sub}, -0.5 \phi_{sub})$;

グループG5の左端の部分光学素子A2については、

$(\Delta x, \Delta y) = (0.5 \phi_{sub}, -4.5 \phi_{sub})$;

グループG15の左端の部分光学素子A3については、

$(\Delta x, \Delta y) = (0.5 \phi_{sub}, 4.5 \phi_{sub})$;

とそれぞれ表される。

【0053】ここで図8(b)を参照すると、グループG1左端の回折光学素子A1からの光線は上記偏差を有しているので、回折光学素子A1の重心位置からx方向に $+4.5 \phi_{sub}$ 分、y方向に $-0.5 \phi_{sub}$ 分進んだ位置に集光し、1つの光点を形成する。このため、長方形形状の基本光学素子51の有効径内に光線が集光することがわかる。

【0054】これに対して、グループG5の右端の部分光学素子A2を射出した光線は、A2の重心位置からy方向に $-4.5 \phi_{sub}$ 分進んだ位置に集光するので、基本光学素子51の有効径から $3 \phi_{sub}$ 分越えた位置に集光し、他の1つの光点を形成する。同様に、グループG15の右端の部分光学素子A3からの光線は、y方向に関して基本光学素子51の有効径を $3 \phi_{sub}$ 分越えた位置に集光し、さらに他の光点を形成する。

【0055】同様のことを全ての部分回折光学素子からの光線について考えると、基本光学素子51による2次光源の有効径は上記光点の集合を全て含む長方形領域として、x-y面において $24 \phi_{sub} \times 8 \phi_{sub}$ の大きさが必要となる。従って、基本光学素子51を図9のように配列すると、回折光学素子21の後段に生成される2次光源の有効径はx-y面内において $24 \phi_{sub} \times 40 \phi_{sub}$ 分必要となる。図12(a)の結像光学系としてx、y方向に対称な系を考えると、 $\phi_{2nd} = 40 \phi_{sub}$ としておく必要があることがわかる。このように2次光源の有効径 ϕ_{2nd} は単純に ϕ_{DOE} ($= 34 \phi_{sub}$)と等しくはならない。

【0056】次に、部分光学素子の焦点距離 f_{sub} は図12(b)に示すように、有効径 ϕ_{sub} と部分照明領域の径 ρ_{sub} とのビーム拡大比率の関係から次式で与えられる。

【0057】

【数3】(3) $f_{sub} = f_L \cdot \phi_{sub} / \rho_{sub}$

ここで、 ϕ_{sub} 、 f_L はそれぞれ上式(1)、(2)で既に求められている。また、 ρ_{sub} は部分照明領域

の径を表している。ここでは、 ρ_{sub} としてフライアイ要素レンズの有効径のFEを用いる。

【0058】以上、簡単のため照明領域を光軸に関して点対称であるとして、1次元方向についての考察を2次元に拡張したが、スキャン型露光機のように有効径がx方向とy方向とで非対称になる場合には、以上の関係式をx、yそれぞれの方向について用いれば良い。

【0059】次に、各部分光学素子の形状と基本光学素子の形状とについて説明する。各部分光学素子の形状は仮想回折レンズ47の表面形状が定まれば、それを分割することによって定めることができる。このため、まず仮想回折レンズ47の表面形状を定める必要がある。仮想回折レンズ47の表面形状は、当該レンズの焦点距離 f_{vir} により定まる。本実施形態では $f_{vir} = f_{sub}$ であり、 f_{sub} は上述の方法によって定められるので、仮想回折レンズの形状が定まることになる。以下、形状を定める手順を説明する。

【0060】平行光を理想的球面波に変換する素子として、焦点距離 f の回折レンズが一般に知られている。図13(a)より、回折レンズの位相分布は光軸からの高さ r の光線が図示のように偏向し、その光線と参照球面との光路差 $\rho(r)$ が、

【0061】

【数4】(4) $\rho(r) = (f^2 + r^2)^{1/2} - f$
となるように設計される。この光路差を得るために、回折レンズ射出面での面内の位相分布 $\phi(r)$ が、

【0062】

【数5】(5) $\phi(r) = 2\pi/\lambda \cdot \rho(r)$
を満足すれば良い。ここで、 λ は光の波長を示している。また、回折レンズの特徴として、式(5)において 2π ごとの周期成分を同一なものとして扱うことができる点が挙げられる。即ち、 $\phi = 0$ と $2\pi \cdot m$ (m は正整数)の成分は同一の構造を探ることができる。これは、式(4)において、 $\rho = 0$ と $\lambda \cdot m$ を同一のものとして扱うことに対応する。図13(b)は、この様子を説明する図である。この位相分布に屈折率の補正を加えたものが回折レンズの表面形状となる。従って、回折レンズの形状は図13(b)に示すように鋸歯状の形状となる。各歯の区切りの点 rm (m は正整数)は光路差 $\rho(r)$ が波長の整数倍となる点である。即ち、

【0063】

【数6】(6) $(f^2 + r^2)^{1/2} - f = m \cdot \lambda$
を解いて、

【0064】

【数7】(7) $rm = [(m\lambda)^2 + 2m\lambda f]^{1/2}$
として得られる。また、 $m \cdot \lambda$ を同一視した回折レンズの位相分布は rm を用いて次式で与えられる。

【0065】

【数8】

(8) $\rho(r) = (f^2 + r^2)^{1/2} - f - m \cdot \lambda$

($rm < r < rm + 1$)

ここで、 r はxy座標によって次式で与えられる。

【0066】

【数9】(9) $r = (f^2 + r^2)^{1/2}$

即ち、焦点距離 f 、波長 λ 、表面形状を求める位置を (x, y) とそれぞれすると、式(9)より r 、式(7)より r が含まれる区間 $[rm, rm + 1]$ がそれぞれ定まる。その結果、式(8)より位置 (x, y) での光路差 $\rho(r)$ が定まる。さらに、回折レンズの基板の屈折率を n とすると、点 r における高さ分布、即ち回折レンズの形状関数 $h(r)$ は次式で求められる(図13(c)参照)。

【0067】

【数10】

(10) $h(r) = \pm \rho(r) / (n - 1)$

ここで、マイナス符号は凸レンズ、プラス符号は凹レンズの場合をそれぞれ示している。また、空気層の屈折率は1としている。

【0068】以上の説明では、 $rm < r < rm + 1$ の各区間内の位相分布が式(8)で表わされる連続した分布の場合について述べたが、近年、この分布を階段形状で近似した、いわゆるバイナリーレンズが提案されている。バイナリーレンズの各区間内の階段の数は量子化数と呼ばれている。図14に量子化数=8のバイナリーレンズの構成例を示す。バイナリーレンズは、ピッチの異なるバイナリーマスクによる露光とエッティングとを繰り返すことによって任意の量子化数で作成できるので、任意の形状のレンズを比較的容易に作成できるという利点を有している。従って、本実施形態のように稠密状態に再配列した複雑な形状の部分光学素子をバイナリーレンズで構成する場合には特に有効である。

【0069】次に、バイナリーレンズの量子化の規則について説明する。バイナリーレンズの量子化数を L とする。各区間 $rm < r < rm + 1$ 内の位相分布 $\rho(r)$ は以下の手順で L 値化される。

【0070】

【数11】

(11) $0 < \rho(r) < \lambda/L$ の場合

$\rightarrow \rho_{sub}(r) = 0$ (一定) に置換；

$\lambda/L < \rho(r) < 2 \cdot \lambda/L$ の場合

$\rightarrow \rho_{sub}(r) = \lambda/L$ (一定) に置換；

$(L-2) \cdot \lambda/L < \rho(r) < (L-1) \cdot \lambda/L$ の場合

$\rightarrow \rho_{sub}(r) = (L-2) \cdot \lambda/L$ (一定) に置換する。

【0071】なお、式(11)の $\rho(r)$ は式(8)に対応している。式(11)を任意の r (x, y より定まる)と対応する m とに適用することによって回折レンズ全面の量子化を行うことができる。そして、式(11)

の置換手順で得られたバイナリー回折レンズの位相分布 $\rho b(r)$ を式(10)に代入することによって、バイナリー回折レンズの表面形状 $h(r)$ を求めることができる。

【0072】次に、最も簡単な例として、量子化数が2の場合のバイナリー回折レンズについて具体的に説明する。量子化数が2のバイナリー回折レンズの各区間 $r_m < r < r_m + 1$ 内の位相分布 $\rho b(r)$ は、式(11)で $L = 2$ と置くことによって次式で与えられる。

【0073】

【数12】 (12) $0 < \rho(r) < \lambda/2$ の場合、
 $\rightarrow \rho b(r) = 0$ (一定) に置換;
 $\lambda/2 < \rho(r) < \lambda$ の場合、
 $\rightarrow \rho b(r) = \lambda/2$ (一定) に置換する。

【0074】ここで、 $\rho(r)$ は式(8)を意味する。図15は、仮想回折レンズ47として、量子化数が2のバイナリー回折レンズを適用した場合の光軸方向から見た概略構成を示す図である。同図において、 $\rho(r) = -\lambda/2$ の輪帯形状部分と、 $\rho(r) = 0$ の輪帯形状とが交互に配置されている。回折光学素子の基板の屈折率を n とすると、二つの領域には $\lambda/2(n-1)$ の段差があることになる。図15の斜線部分は図8で示した部分光学素子への分割グループの1つを示している。即ち、図15に示す分割グループ単位で、2量子化バイナリー回折レンズが分割され、上述したように稠密状態に再配列したものが新たな基本光学素子51の形状分布となる。

【0075】以上説明したように、部分光学素子の焦点距離 f_{sub} が定まれば式(7)～(10) (バイナリーレンズの場合はさらに式(11)も含める)によって仮想回折レンズの表面形状が定まり、それを部分光学素子に分割し、稠密状態に再配列することで基本光学素子の形状を定めることができる。そして、基本光学素子を複数繰返して配列することで回折光学素子21全体の表面形状を定めることができる。回折光学素子21を構成する部分光学素子の配列は、2次光源列が回折光学素子21の中心軸に対称で、かつ回折光学素子21の有効径全面に分布するように再配列することもできる。図16は、2量子化バイナリー回折レンズを稠密状態に再配列した構成を示す図である。

【0076】図16は、図15に示したパターンをグループに分割して、稠密状態に再配列して得た新たな基本光学素子51の構成を示す図である。これをY方向に17個繰返して配列したものが回折光学素子21となる。そして、このパターンに対応するマスクをEB描画によって作成し、そのマスクの下にフォトレジストを塗布した石英ガラス基板を配置し、パターンを露光して現像し、エッチングすることによって回折光学素子21を作

(15) $\phi_{2nd} = 40 \phi_{sub} = 47.059 \text{ mm}$
 である。次に式(2)の右辺に上記で求めた値を代入し

成することができる。

【0077】また、量子化数が2の回折レンズは凸レンズ効果と凹レンズ効果とを同時に有することに起因して、回折レンズの法線に対して対称的に±1次光が発生する。この±1次光は、図17に示すように有効に利用することができる。図17では、部分光学素子50の照明領域とフライアイ・インテグレータ6の要素レンズの有効径とが1対1に対応した例である。部分光学素子50は量子化数2のバイナリー回折レンズで構成されているので、+1次光(実線)と-1次光(点線)とが同時に発生する、しかし、図からも明らかなように+1次光と-1次光とは焦点位置が異なるのみであり、フライアイ・インテグレータの要素レンズの入射面では同じ領域に重複する。また、要素レンズ射出面には2つのスポットが形成されるが、スポット間の距離 L は非常に近いので、実質的な差異を生じない。なお、凹レンズに対応するスポットは、凸レンズに対応するスポットより要素レンズ側になるので、そのスポットが要素レンズ部材中に形成されないように設定することが望ましい。なお、部分光学素子50の照明領域とフライアイ・インテグレータ6の要素レンズの有効径が1対1対応している例について説明したが、1対1に対応していない場合においても原理は同様である。

【0078】量子化数が2の場合の回折レンズの+1次光と-1次光とが有効利用できる結果、±1次光の各回折効率は41%であるが、その合計の効率は82%となり、高い回折効率を得ることができる。

【0079】以下に具体的な数値例を示す。回折光学素子21は、図8(b)及び図9に示したように34個×34個の部分光学素子から構成されている場合を考える。また、光学系の全長、露光領域の制限等を考慮して、以下の値を用いる。

【0080】

【数13】 (13) $\phi_{DOE} = 40 \text{ mm}$
 $\phi_{FE} = 4 \text{ mm}$
 $f_{FE} = 20 \text{ mm}$

また、 $\rho_{sub} = \phi_{FE}$ 、 $\phi_{3rd} = \phi_{FE}$ とする。まず、式(1)に ϕ_{DOE} と $k = 34$ を代入し、部分光学素子50の有効径 ϕ_{sub} を得る。

【0081】

【数14】

(14) $\phi_{sub} = \phi_{DOE}/k = 1.176 \text{ mm}$
 ϕ_{sub} が定まったので2次光源の有効径 ϕ_{2nd} が定まる。図8、9に示した配列の場合は、既に検討したように、

【0082】

【数15】

て f_L を得る。

【0083】

【数16】

$$(16) \quad fL = \phi 2nd / \phi 3rd \cdot fFE$$

$$= 235.294 \text{ mm}$$

また、式(3)より f_{sub} が得られる。

【0084】

【数17】

$$(17) \quad f_{sub} = fL \cdot \phi_{sub} / \rho_{sub}$$

$$= 69.204 \text{ mm}$$

そして、 f_{sub} と波長入、屈折率 n を式(7)～(10)の組に代入することによって、部分光学素子50の位相分布と表面形状を定めることができる。バイナリーレンズを使用する場合には式(10)の位相分布 ρ として式(11)の ρ_b を用いれば良い。このようにして部分光学素子50のすべての表面形状が決定され、部分光学素子50を図8bのように配列したものが基本光学素子のパターンとなる。さらに基本光学素子を図9のように配列したものが回折光学素子21全体のパターンとなる。そして、このパターンに従って、電子線マスクをEB描画し、レジストを塗布したガラス基板に転写し、パターンをエッチングすることによって回折光学素子21を製造することができる。

【0085】次に、光学系の収差補正について説明する。上述の回折光学素子の設計手順では、照明光学系で発生する収差について特に議論せずに説明した。しかし、実際の照明系では種々の収差が発生する。このような照明光学系の典型的な光線収差としては、フライアイ・インテグレータの要素レンズが正弦条件を満足しないことによる収差がある。要素レンズは入射面の屈折面が1面しかないので正弦条件を満足することができない。正弦条件が満足されないと、要素レンズ入射面の光線密度とレチクル面の光線密度とに変化が生じるので、レチクル面の照明光の強度が不均一となる。また、その他にもリレーレンズ、コンデンサーレンズなどから発生する収差によってレチクル面の照明光の均一度は影響を受ける。

【0086】本実施形態のように部分光学素子50とフライアイ・インテグレータの要素レンズが1対1に対応する配置ではこの収差や回折の影響を総合的に補正することができる。図18は、回折光学素子からレチクル面までを模式的に示す図である。ここで、一つの部分光学素子50を通過した光線は必ず1つのフライアイ・インテグレータの要素レンズに対応し、最終的にレチクル面と共に役関係となっている。光路中には要素レンズより小さい光学素子の単位は存在しないので、この素子と1対1対応にある部分光学素子50によって全ての有効径内の収差を補正することができる。この収差を補正する手順を以下(1)～(4)に説明する。

【0087】(1) 収差補正を行っていない回折光学素子中の各部分光学素子50の位相分布を $\phi_k(x, y)$

とする。ここで $k = 1 \sim 1156$, (x, y) は各部分光学素子50内の位置座標をそれぞれ示している。図18のように各部分光学素子50からコンデンサーレンズまでの合成系を一つのアフォーカル系とみなす。即ち、合計で1156個のアフォーカル系を考える。

【0088】(2) 上記アフォーカル系の波面収差を、 $k = 1 \sim 1156$ について算出する。得られた波面収差を位相単位に変換し、 $\phi_k' = (x, y)$ 、 $k = 1 \sim 1156$ とする。

【0089】(3) 上記(2)の波面収差を補正した部分光学素子50の位相分布 $\phi''_k(x, y)$ を $\phi''_k(x, y) = \phi_k(x, y) - \phi'_k(x, y)$ として定める。これが部分光学素子50で吸収する収差の成分である。このとき、 $\phi''_k(x, y)$ が $0 \sim 2\pi$ を超える場合には 2π の剰余を再び $\phi''_k(x, y)$ と再定義する。さらに、バイナリーレンズを利用する場合には $\phi''_k(x, y)$ を量子化に応じた位相分布に変換する。

【0090】(4) $\phi''_k(x, y)$ に応じて各部分光学素子50の表面形状を定める。

【0091】以上説明した手順で定めた表面形状の部分光学素子50を、最初に説明した収差補正を行っていない回折光学素子の部分光学素子50と置換することによって収差が補正された照明光学系を得ることができる。

【0092】次に、インテグレート効果と空間コヒーレンスについて説明する。本実施形態では部分光学素子50による照明領域がフライアイ・インテグレータの要素レンズに対応している。従って、回折光学素子21の中の部分光学素子50数がビーム断面の分割数となり、これがレチクル面で重畳する。インテグレート効果は部分光学素子50の合計数 $34 \times 34 = 1156$ である。また、波長 246 nm のエキシマーレーザの空間コヒーレンスは、 x, y それぞれの方向の可干渉距離 L_x, L_y として表わされる(ただし、 y 方向をガウス分布の方向とする)。 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ の断面に拡大した場合の L_x, L_y の典型的な値はそれぞれ $0.5 \text{ mm}, 1 \text{ mm}$ である。本実施形態の部分光学素子50の有効径は $1.176 \text{ mm} \times 1.176 \text{ mm}$ なので、可干渉距離より大きいピッチで配列されている。従って、各部分光学素子50を通過して最終的にレチクル面に重畳される光線の干渉の度合いを非常に小さくできる。さらに好ましくは、残存する微小な干渉ノイズを取り除くために図1の振動ミラー5の角度を露光中に変化させ、干渉ノイズを平均化する事が望ましい。また、振動ミラーの代わりに、回折光学素子21の前段に微小なくさび角をつけた円盤ガラス板を配置し(不図示)、露光パルスに同期させ、全露光時間でほぼ1回転させてよい。さらに、くさびガラス板の変わりに回転拡散板(いわゆるレモンスキン板)を配置しても略同じ効果を得ることができる。

【0093】また、上記例では、フライアイ要素レンズ

と同じ大きさの領域を部分照明領域としたが、これに限られるものではなく、図19に示すように、フライアイ要素レンズよりも少し小さい領域を部分照明領域とすることもできる。各部分照明領域の周辺部は回折光学素子の製造誤差又は回折広がりによってボケを生じるが、かかるボケはレチクルブラインドにより図20(a)に示すように遮光することで、中央の均一な部分のみを露光領域として使用できる(図20(b))。レチクルブラインドとは、フライアイ・インテグレータ6とレチクルとの間のレチクル面と共に位置に設けられた視野絞りをいい、上述のように周辺の光量不均一部分をカットする役割を有する。

【0094】(第2実施形態)第2実施形態では、回折光学素子22により通常の円形照明を行う。図1において、モータMT1によりレボルバ3を回転し回折光学素子22を光路中へ挿入し、モータMT2によりレボルバ7を回転し開口絞り35を選択する。

【0095】次に、本実施形態にかかる回折光学素子22の詳細を説明する。回折光学素子22の設計手順は上述の回折光学素子21と同様であるので重複する部分の説明は省略する。本実施形態は、フライアイ・インテグレータ6上に生成される強度分布が円形照明である点で第1実施形態と異なる。図21はフライアイ・インテグレータ6の入射面のx-y断面を示している。太線で囲まれた部分が各基本光学素子によってフライアイ・インテグレータ6の入射面に生成される基本照明領域60である。なお、第1実施形態と同様に部分照明領域61はフライアイ・インテグレータの要素レンズ入射面と一致させる。

【0096】回折光学素子22の設計手順は第1実施形態の場合と同様である。即ち、基本照明領域60と部分照明領域61との分割パターンを仮想回折レンズに投影し、回折光学素子22内の部分光学素子の配列を決定する。そして、部分光学素子の有効径と焦点距離を決め、これらを用いて最終的な部分光学素子の位相分布と表面形状を決定する。仮想回折レンズは、図22(a)に示すように、G1~G20の20個のグループに分割される。ここで、各グループは複数の部分光学素子62から構成されている。そして、各グループを図22(b)のように、10列×2行の形に稠密状態に再配列したものが新たな基本光学素子63となる。換言すると、新たな基本光学素子は、40個×2列の部分光学素子62から構成されている。最後に、基本光学素子63をy方向に20個繰り返して配列することによって全体で40個×40個の部分光学素子62から構成される正方形領域の新たな回折光学素子22が形成される。

【0097】以下に具体的な数値例を示す。本実施形態は、第1実施形態においてレボルバを回転させた状態なので、 ϕ_{DOE} 、 ϕ_{FE} 、 f_{FE} は第1実施形態と同じ値である。また、 $\rho_{sub} = \phi_{FE}$ 、 $\phi_{3rd} = \phi_{FE}$

とする。

【0098】式(1)に ϕ_{DOE} と $k = 40$ を代入し、部分光学素子62の有効径 ϕ_{sub} を得る。

【0099】

$$\begin{aligned} \text{【数18】 (18)} \quad \phi_{sub} &= \phi_{DOE} / k \\ &= 1.000 \text{ mm} \end{aligned}$$

ϕ_{sub} が定まったので2次光源の有効径 ϕ_{2nd} が定まる。 ϕ_{2nd} は第1実施形態の場合と同様に、部分光学素子の配列に関して以下の結果を得る。

【0100】

$$\begin{aligned} \text{【数19】 (19)} \quad \phi_{2nd} &= 46 \phi_{sub} \\ &= 46.000 \text{ mm} \end{aligned}$$

次に、式(2)の右辺に上記値を代入し、 f_L を得る。

【0101】

【数20】

$$\begin{aligned} \text{【(20) } \quad f_L &= \phi_{2nd} / \phi_{3rd} \cdot f_{FE} \\ &= 230.000 \text{ mm} \end{aligned}$$

また、式(3)より、 f_{sub} を求める。

【0102】

【数21】

$$\begin{aligned} \text{【(21) } \quad f_{sub} &= f_L \cdot \phi_{sub} / \rho_{sub} \\ &= 57.500 \text{ mm} \end{aligned}$$

そして、 f_{sub} と波長 λ 、屈折率 n を式(7)~(10)の組に代入することによって、部分光学素子62の位相分布と表面形状を定めることができる。バイナリーレンズを使用する場合には式(10)の位相分布 ρ として式(11)の ρ_b を用いれば良い。この手順により部分光学素子62のすべての表面形状が決定され、それを図22(b)のように配列したものが基本光学素子63のパターンとなる。そして、さらに基本光学素子63をy方向に20個繰り返し配列したものが回折光学素子22全体のパターンとなる。該パターンに従って、電子線マスクをEB描画し、フォトレジストを塗布したガラス基板に転写し、パターンをエッチングすることによって回折光学素子22を作成することができる。

【0103】ここで、照明方法を変更すると2次光源面の有効径 ϕ_{2nd} が変化するので、充填率を一定の値に維持する場合はリレーレンズの焦点距離 f_L が変化する。従って、リレーレンズは焦点距離が可変な構成とすることが望ましい。例えば、第2実施形態ではリレーレンズを構成するレンズ素子を光軸方向に移動すること、又は焦点距離の異なる他のレンズ素子をリレーレンズ内に挿脱すること(単に挿脱する場合の他、置換する場合を含む)で第1実施形態と異なる配置にすることによって焦点距離 f_L を変更している。

【0104】また、同様の理由により、第2実施形態と第1実施形態では部分光学素子の焦点距離 f_{sub} が異なっている。従って、回折光学素子は焦点距離の相違を加味してレボルバーに設置する事が望ましい。例えば、第1実施形態と第2実施形態でリレーレンズの焦

点面を一定とし、焦点距離のみ変化した場合には、部分光学素子の焦点距離 f_{sub} のずれ量だけ回折光学素子の z 方向の位置をずらして配置する必要がある。具体的には、第1実施形態における部分光学素子の焦点距離 f_{sub} は、第1実施形態における部分光学素子の焦点距離 f_{sub} よりも 11.704 mm 短くなっている。従って、第2実施形態の回折光学素子22は第1実施形態の回折光学素子21よりもフライアイ・インテグレータ側に 11.704 mm シフトした位置に配置することが望ましい。

【0105】ここで、リレーレンズの焦点面と焦点距離とを同時に変更する構成とすることもできる。そして、第1実施形態と第2実施形態との部分光学素子の焦点距離 f_{sub} のずれ分を吸収するようにリレーレンズの焦点面位置を設定することができる。この場合には、回折光学素子22と回折光学素子21の z 方向の位置は同じにすることができる。なお、充填率を一定としない場合は、光束がケラれない範囲でリレーレンズの焦点距離 f_L を一定とすることもできる。

【0106】また、照明系の収差補正に関しても、第1実施形態と同様の手順で行うことができる。なお、充填率を光束がケラれない範囲に設定し、かつ収差補正をしない場合には照明方法を変更しても焦点距離 f_L 、 f_{sub} を一定とすることができます。この場合、回折光学素子を配置する位置は固定されていて良い。

【0107】ここで、本実施形態の場合のインテグレータ効果は $40 \times 40 = 1600$ である。また、部分光学素子63は $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ の大きさであるので、波長 246 nm のエキシマレーザの典型的な空間的可干渉距離 ($L_x = 0.5\text{ mm}$, $L_y = 1\text{ mm}$) 以上となっている。従って、各部分光学素子63を通過して、最終的にレチクル面に重畳される光線の干渉の度合いを非常に小さくできる。さらに好ましくは、残存する微小な干渉ノイズを、第1実施形態と同様に振動ミラー等の手段によって露光中に平均化を行なうことが望ましい。

【0108】(第3実施形態) 第3実施形態は、本発明をスキャン型露光機に適用したものである。スキャン型露光機は、図1におけるレチクルとウエハとが1回の露光中に同期して移動し、広い露光範囲を得ることができる。本スキャン露光装置は、スキャン停止時において長方形の露光エリアを備えており、これをスキャンすることで全露光領域を得ている。従って、本スキャン露光機のフライアイ・インテグレータの要素レンズの形状は、上記各実施形態と異なり正方形でなく長方形となる。

【0109】以下、本スキャン露光機において輪帯照明を行う場合の回折光学素子について説明する。図23は、フライアイ・インテグレータの $x-y$ 平面の構成を示す図である。図23において、 y 方向がスキャン方向に対応する。点線はフライアイ・インテグレータ射出面の輪帯絞り、太線はこの輪帯照明に対応するためのフ

ライアイ・インテグレータ入射面の照明領域、即ち、基本照明領域70を示している。細線で区切られた長方形の部分がフライアイ・インテグレータの要素レンズを示している。要素レンズの有効径は $8\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ であり、 $x-y$ 平面について 7列 \times 14行の形で配列されている。従って、フライアイ・インテグレータの全有効径は $56\text{ mm} \times 56\text{ mm}$ となる。

【0110】図24は、基本照明領域70を部分照明領域71に分割した構成を示す図である。部分照明領域41は各フライアイ要素レンズに対応させている。この回折光学素子も上記各実施形態と同様に作成することができる。まず、基本照明領域70と部分照明領域71の分割パターンを仮想回折レンズに投影し、回折光学素子内の部分光学素子の配列を決定する。次に、部分光学素子の有効径と焦点距離を決め、それらを用いて最終的な部分光学素子の位相分布と表面形状を決定する。図25

(a) は、第3実施形態における仮想回折レンズの分割の方法を示す図である。仮想回折レンズは G1～G26 の 26 個のグループに分割されている。ここで、各グループは複数の部分光学素子72から構成されている。次に、図25(b) のように各グループを 34列 \times 2行の形に稠密状態に再配列して新たな基本光学素子73とする。そして、図26に示すように、新たな基本光学素子73を y 方向に 17 個繰返して配列することによって回折光学素子を構成する。ここで、 $x-y$ 方面における部分光学素子数は 34 個 \times 34 個となる。なお、各部分光学素子72の形状はフライアイ要素レンズに対応して長方形となっているので、全有効径も長方形となる。従って、回折光学素子への入射ビームもほぼ同じ大きさの長方形に整形しておくことが望ましい。

【0111】以下、具体的な数値例を示す。まず、回折光学素子は図25, 26に示すように配列されており、34 個 \times 34 個の部分光学素子から構成されている場合を考える。また、光学系の全長、露光領域の制限等から以下の値が定まっているものとする。以下、 x 方向成分、 y 方向成分にはそれぞれ x 、 y の添字を付して表すものとする。

【0112】

【数22】 (22) $\phi_{DOE_x} = 40\text{ mm}$

$\phi_{DOE_y} = 20\text{ mm}$

$\phi_{FE_x} = 8\text{ mm}$

$\phi_{FE_y} = 4\text{ mm}$

$f_{FE} = 20\text{ mm}$

また、 $\rho_{sub_x} = \phi_{FE_x}$,

$\rho_{sub_y} = \phi_{FE_y}$,

$\phi_{3rd_x} = \phi_{FE_x}$,

$\phi_{3rd_y} = \phi_{FE_y}$,

とそれぞれする。

【0113】まず、式(1)に ϕ_{DOE_x} , ϕ_{DOE_y} と $k = 34$ を代入し、部分光学素子72の有効径 ϕ

ϕ_{sub_x} , ϕ_{sub_y} を得る。

【0114】

【数23】

$$(23) \quad \phi_{sub_x} = \phi_{DOE_x} / k_x \\ = 40 \text{ mm} / 34 \\ = 1.176 \text{ mm} \\ \phi_{sub_y} = \phi_{DOE_y} / k_y \\ = 20 \text{ mm} / 34 \\ = 0.588 \text{ mm}$$

ここで、 ϕ_{sub} が定まったので2次光源の有効径 ϕ_{nd_x} , ϕ_{nd_y} が定まる。 ϕ_{nd} は第1実施形態の場合と同様に、上述の部分光学素子の配列に関して検討することができる。

【0115】

【数24】

$$(24) \quad \phi_{nd_x} = 26 \cdot \phi_{sub_x} \\ = 30.588 \text{ mm}$$

$$(26) \quad f_{sub} = f_L \cdot \phi_{sub_y} / \rho_{sub_y} \\ = 19.031 \text{ mm}$$

このように求めた f_{sub} と波長入、屈折率nを式(7)～(10)の組に代入することによって、部分光学素子72の位相分布と表面形状を定めることができる。バイナリーリフレンズを使用する場合には式(10)の位相分布 ρ として式(11)の ρ_b を用いれば良い。このようにして部分光学素子72のすべての表面形状が決定され、図25(b)のように稠密状態に再配列したものが基本光学素子73のパターンとなる。さらに、基本光学素子73を図26のように繰り返して配列したものが回折光学素子全体のパターンとなる。このパターンに従って、電子線マスクをEB描画し、レジストを塗布したガラス基板に転写し、パターンをエッチングすることによって回折光学素子を作成することができる。

【0118】第3実施形態におけるインテグレート効果は $34 \times 34 = 1156$ である。また、各部分光学素子72の有効径は $1.176 \text{ mm} \times 0.588 \text{ mm}$ である。さらに、ビーム径を $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ に拡大した時の波長 246 nm のエキシマレーザの典型的な空間的可干渉距離は $L_x = 0.5 \text{ mm}$, $L_y = 0.5 \text{ mm}$ である。即ち、 x , y いずれの方向に関しても、部分光学素子72の有効径が可干渉距離よりも大きくなっている。従って、各部分光学素子72を通過して最終的にレチクル面に重畳される光線の干渉の度合いを非常に小さくできる。さらに好ましくは、残存する微小な干渉ノイズを、第1実施形態と同様に振動ミラー等によって露光時間中に平均化を行なうことが望ましい。

【0119】(第4実施形態) 次に、本発明の第4実施形態について説明する。本実施形態の基本的な設定は第1実施形態と同様である。本実施形態で特徴的な点は以下に述べる設計手順にある。第1実施形態では仮想レンズを用いて設計を行なったが、本実施形態では基本照明領

$$\phi_{nd_y} = 44 \cdot \phi_{sub_y}$$

$$= 25.882 \text{ mm}$$

以上のように、 ϕ_{nd_x} は ϕ_{nd_y} より大きいが、フライアイ要素レンズの x y 有効径比が $2:1$ であることと、前段に配置するリフレンズが回転対称レンズであることを考慮すると、3次光源において光束がケラれないためには、 y 方向の値によって f_L を定める必要があることが理解される。従って、式(2)の右辺に ϕ_{nd_y} , ϕ_{3rd_y} , f_{FF} を代入し、 f_L を得る。

【0116】

【数25】

$$(25) \quad f_L = \phi_{nd_y} / \phi_{3rd_y} \cdot f_{FF} \\ = 129.412 \text{ mm}$$

また、式(3)より、 f_{sub} を求める。

【0117】

【数26】

域を部分照明領域に分割し、この部分照明領域をグループ分けすることで設計を行う。本実施形態では部分光学素子50が回折格子から構成されている。まず、この回折格子の設計手順について説明する。本実施形態では、1つの部分光学素子は部分照明領域の1つを照明するように設計する。このためには、以下の2つの条件

(A), (B)を満足することが望ましい。(A)部分光学素子に入射した光束を部分照明領域の幅に変換すること。(B)任意の部分照明領域を照明するために、上記(A)の照射関係を所望の方向にシフトできること。

【0120】上記条件を図30を用いて説明する。図30は、部分光学素子として通常の光軸に回転対称なレンズ成分と同等の位相分布を有する回折格子50を使用した場合の光線の光路(実線)を示す図である。部分光学素子に入射した径 ϕ_{sub} (部分光学素子の有効径と等しい)の光束は、部分光学素子50とリフレンズ4とで構成される光学系によって径 ϕ_{sub} の光束に変換され、光軸上の部分照明領域Aを照明する。

【0121】ここで、部分光学素子50は、その位相分布として上記回転対称成分に加えて偏向を引き起こす位相成分を有する場合を考える。この場合には、光線は図30の点線で示すように偏向され、光軸から偏芯した部分照明領域Bを照明することができる。このような偏向を引き起こす位相分布を部分光学素子ごとに適宜選択することによって所望の部分照明領域を照明することができる。これが、本実施形態における部分光学素子の原理である。なお、部分光学素子の有効径 ϕ_{sub} 、焦点距離 f_{sub} 、部分照明領域の大きさ ρ_{sub} 、リフレンズ4の焦点距離 f_L は、上述した式(3)を満足することが望ましい。

【0122】次に、このような部分光学素子の表面形状

決定方法について説明する。初めに、部分光学素子50の位相分布の決定方法について述べる。まず、通常の回折レンズ（偏向成分を含まない場合）について説明する。

【0123】A. 回折レンズ（偏向成分を含まない場合）

上述したように、焦点距離 f ($=f_{\text{sub}}$) の回折レンズは平行光を理想的球面波に変換する素子として設計可能であることが一般に知られている。図30における部分照明領域Aを照明する偏向成分を含まない回折レンズの表面形状を決定する手順については、図13 (a) ~ (c) を用いて説明した回折レンズの場合と同様である。また、この回折レンズをバイナリ回折レンズで構成する場合についても、図14を用いて説明した場合と同様の手順でバイナリ化することができる。

【0124】B. 回折レンズ（偏向成分を含む場合）

偏向成分（部分照明領域Bを照明する成分）を含む回折レンズは、上述の偏向成分を含まない通常の回折レンズに対して偏向成分を加算することによって設計することができる。そこで、偏向成分の位相分布の決定方法について説明する。ここで、偏向の位相成分は1次元のグレイティング (grating) の位相成分と同一視して設計を行う。まず、この1次元グレイティングについて説明する。

【0125】1次元グレイティングとは、入射光束を一定の角度だけ偏向した光束に変換するグレイティングである。1次元グレイティングの形状の一例を図31 (a) に示す。図31 (a) はフレネルレンズ型の位相グレイティングであり、入射光のほぼ全てが1次回折光の方向に射出されるものである。ここで、1次回折光の射出角 θ とピッチ P の関係は波長 λ として次式で与えられる。

【0126】

$$【数27】(27) P = \lambda / \sin \theta$$

【0127】このグレイティングの位相分布 $\rho_{\text{dif}}(y)$ は図31 (b) に示すように1ピッチごとに位相変化が発生するものとなる。

【0128】

$$【数28】(28) \rho_{\text{dif}}(y) = -y \cdot \lambda / P$$

【0129】このような1次元グレイティングをリレーレンズ4の前段に配置すると、図32に示すように光軸上の光線がフライアイ・インテグレータ6面上の高さ r_{FEA} の位置に入射する光線に変換される。この原理によって図30の点線で示す照明光を得ることができる。また、リレーレンズ4は、角度 θ の光線を次式に基づいてフライアイ・インテグレータ6面上の高さ r_{FEA} の位置に変換する理想レンズを想定する。

$$(33) s = y \cdot y_{\text{FEA}} / r_{\text{FEA}} + x \cdot x_{\text{FEA}} / r_{\text{FEA}}$$

【0141】

$$【数34】(34) P = \lambda \cdot f L / r_{\text{FEA}}$$

【0130】

$$【数29】(29) r_{\text{FEA}} = f L \cdot \sin \theta$$

【0131】式(27)と(29)より $\sin \theta$ を消去して、Pについて解くと次式を得る。

【0132】

$$【数30】(30) P = \lambda \cdot f L / r_{\text{FEA}}$$

【0133】このPを式(28)に代入して、1次元グレイティングの位相分布 $\rho_{\text{dif}}(y)$ が定まる。

【0134】

【数31】

$$(31) \rho_{\text{dif}}(y) = -y \cdot r_{\text{FEA}} / f L$$

【0135】式(31)から明らかのように、グレイティング上の座標 y 、リレーレンズ4の焦点距離 $f L$ 、フライアイ・インテグレータ6上の照明領域の重心座標 r_{FEA} を定めると、偏向のための1次元グレイティングの位相分布 $\rho_{\text{dif}}(y)$ が定まるることを示している。この位相分布 $\rho_{\text{dif}}(y)$ を式(4)の回転対称レンズの位相分布 $\rho(r)$ に加算したものを部分光学素子とすることによって、図30の点線で示すような光路の光線、即ち偏向成分の光線を得ることができる。なお、以上では1次元グレイティングを $f L$ の焦点位置に配置した場合について説明したが、焦点位置より f_{sub} 分だけ後側（実際に部分光学素子を配置する位置）に配置した場合でも、結局角度 θ の光線は r_{FEA} の位置に到達するので、上記原理はそのまま適用できる。

【0136】以上の説明では y 方向の偏向の場合について述べたが、実際にはフライアイ・インテグレータの入射面内の任意の2次元座標の位置への偏向が必要である。このため、任意の位置へ偏向する場合の偏向位相分布を図33に基づいて説明する。

【0137】図33は、リレーレンズの前段に1次元グレイティングを配置し、光軸上の光束をフライアイ・インテグレータ入射面上のA点（座標を $x_{\text{FEA}}, y_{\text{FEA}}$ とする）に偏向する場合を示している。ここで、リレーレンズとしては式(29)の関係式を満たすものを想定する。

【0138】以上の配置において、1次元グレイティング上の座標 (x, y) における位相分布 $\rho_{\text{dif}}(x, y)$ は、上述の y 方向に関する議論を図33の角度 θ だけ傾けた面内について検討することによって算出することができる。

【0139】

$$【数32】(32) \rho_{\text{dif}}(x, y) = -s \cdot \lambda / P$$

ここで、

【0140】

【数33】

【0142】

【数35】

$$(35) \quad r_{\text{FEA}} = [y_{\text{FEA}}^2 + x_{\text{FEA}}^2]^{1/2}$$

である。

【0143】なお、上記の説明ではリレーレンズ4は角度θの光線をfL・sinθの高さに変換する場合を扱ったが、一般にはレンズの配置や収差によって他の場合も起これうる。これは実際のリレーレンズを光線追跡することによって求められる。この場合には光線追跡の結果に基づいて式(29)に補正を加えた上で式(32)～(35)の関係式を設定することが望ましい

【0144】C. 偏向成分を含む回折レンズのまとめ

フライアイ・インテグレータ6の入射面の位置(x_FEA)

$$(37) \quad \rho(x, y) = ((f_{\text{sub}}^2 + r^2)^{1/2} - f_{\text{sub}})$$

【0147】

$$【\text{数38}] \quad (38) \quad r = [y^2 + x^2]^{1/2}$$

【0148】また、 $\rho_{\text{dif}}(x, y)$ は式(32)～(35)である。

【0149】式(32)～(38)に、位相を算出する座標点(x, y)、部分光学素子の焦点距離 f_{sub} 、リレーレンズの焦点距離 f_L 、部分照明領域の重心(x_FEA, y_FEA)を代入することによって、所望の部分照明領域を照明するための部分光学素子の位相 ρ_{tot} (x, y)を算出することができる。ここで、最終的な部

$$(39) \quad h(x, y) = -\rho_{\text{tot}}(x, y)$$

【0152】ここで、nは部分光学素子の基盤屈折率である。また、基盤周囲の雰囲気は空気充填とし屈折率を1とする。以上説明した手順が部分光学素子の設計方法の詳細である。

【0153】なお、部分光学素子の焦点距離 f_{sub} とリレーレンズの焦点距離 f_L とを決定する手順は、図12(a), (b)を参照して上記式(2), (3)に基づいて説明した手順と同様である。

【0154】次に、部分光学素子の配列について説明する。例えば、図6で示した68個の部分照明領域に対応する部分光学素子の配列方法を検討する。まず、図30において部分光学素子への入射光と部分照明領域の照射関係より、部分光学素子と部分照明領域とは相似形であることがわかる。図6に示す場合は、1つの部分光学素子は正方形である。従って、基本光学素子は68個の正方形素子を所望の領域に配列したものから構成される。この一例を図34(a), (b)に基づいて説明する。図34(a)は簡単のため、フライアイ・インテグレータ6上の68個の部分照明領域を20個のグループG1～G20にまとめた場合を示している。ここで、上述の説明からわかるように、部分光学素子もG1～G20のグループと相似形にまとめられる。図34(b)は、上述の手順に従って、部分照明領域のグループG1～G20を照明するための部分光学素子のグループG1～G20を稠密に配列した例である。そして、この全体が基本光学素子51となる。ここで、図34(a)の各グループ内の部分照明領域の配置と、それに対応する図34

EA、y_FEA)を重心とする部分照明領域を照明するための、回折レンズの位相分布 ρ_{tot} は式(4)と式(32)とを加算したものとして得られる。

【0145】

【数36】

$$(36) \quad \rho_{\text{tot}}(x, y) = \rho(x, y) + \rho_{\text{dif}}(x, y)$$

ここで $\rho(x, y)$ は回転対称レンズ成分の位相であり、次式で与えられる。

【0146】

【数37】

分光学素子の表面形状を決定する際の位相分布は上記 $\rho_{\text{tot}}(x, y)$ を $\rho_{\text{tot}} = 0$ と $\lambda \cdot m$ (mは正整数)を同一視した位相分布に変換したもの $\rho_{\text{tot}}'(x, y)$ を使用する。また、位相分布 $\rho_{\text{tot}}'(x, y)$ をさらに量子化し、バイナリーオプティクスとして製造することもできる。

【0150】そして、最終的な部分光学素子の表面形状 $h(x, y)$ は $\rho_{\text{tot}}'(x, y)$ によって次式で与えられる。

【0151】

【数39】

$$(x, y) / (n - 1)$$

(b) の部分光学素子の各グループ内の配置は180度回転した配置となっている。

【0155】基本光学素子51において例えばグループG1は3つの部分光学素子50からなっている。これは対応する部分照明領域のグループ1が3つの部分照明領域によって構成されていることに対応している。同様に最終的には基本光学素子51はx, yについて 34×2 行の部分光学素子50から構成されることになる。この基本光学素子51と同じ形状のビーム入射した場合には図34(b)の各部分光学素子50が図34(a)の部分照明領域を1対1に照明する。すなわち、図34

(a)の太線で示した輪帯部分のみが照明され、他の不要部分は照明されない。このように本基本光学素子51は光量ロスなく所望の輪帯照明を行なうことができる。

【0156】また、本実施形態では基本光学素子51をy方向に複数配置するのが望ましいことは、図9を用いて説明した場合と同様である。図9では基本光学素子51をy方向に17個繰り返し配置している。この全体が回折光学素子21となる。かかる配置によって入射光をさらに一層平均化することができる。上述のように基本光学素子51は 34×2 個の部分光学素子からなるので、回折光学素子21は 34×34 個の部分光学素子によって構成されることになる。

【0157】以上説明した手順に基づいて回折光学素子21内の部分光学素子の配列方法が決定される。この有効径が ϕD_{OE} に対応する。従って部分光学素子の有効径は部分光学素子の個数kと ϕD_{OE} から式(1)で求

めることができる。

【0158】なお、ここで、 ϕ_{DOE} と k が x と y とで対称的な場合について説明したが、非対称な場合については式(1)をそれぞれの方向について計算すればよい。

【0159】次に、図9の回折光学素子の場合について、その射出面に生成される2次光源の有効径 ϕ_{2nd} を求める。この有効径は、図30用いて説明した偏向原理における焦点位置のシフト Δ を加味して算出することが望ましい。図30に示したように、部分光学素子の後段に生成される光スポットは偏向によって種々の方向にシフトするので、回折光学素子21の射出面に生成される全ての光スポットを包含する領域が2次光源の有効径 ϕ_{2nd} となる。

【0160】各部分光学素子ごとの光スポットのシフト量は部分照明領域の重心位置に比例して求めることができる。図35は部分光学素子50によって、フライアイ・インテグレータ面の座標において、重心が y_{FEA} である部分照明領域46を照明する場合を示している。図35における点線で示す光路は、図30で説明した設計原理によるものである。また、実線で示す光路は偏向によって生じたスポットシフト量 Δ だけ引き戻して、光スポットが光軸上に一致するように部分光学素子50をシフトさせた場合のものである。部分光学素子をシフトしても光線の角度は変化しないため、実線で示す配置の場合でも、破線で示す光路の場合と同じ部分照明領域を照明することができる。

【0161】ここで、実線の光路の主光線に着目すると、スポットシフト Δ と部分照明領域の重心位置とは次式の比例拡大関係にあることがわかる。

【0162】

【数40】

$$(40) \quad \Delta = f_{sub} / f_L \cdot y_{FEA}$$

$$= \phi_{sub} / \rho_{sub} \cdot y_{FEA}$$

【0163】上式で ϕ_{sub} 、 ρ_{sub} を一定であると考えると、スポットシフト量 Δ は部分照明領域の重心位置 y_{FEA} によって決定されることがわかる。以上の原理を2次元の $x-y$ 方向について拡張することによって2次元的なスポットシフト量を見積もることができる。

【0164】図34中の矢印は、この原理によって2次元的なスポットシフト量を見積もるためのものである。すなわち図34(a)の各矢印は各部分照明領域の光軸を基準とした重心を指しているので、この重心座標を式(40)を2次元的に拡張した式に代入することによって2次元的なスポットシフト量を算出できる。例えば、図34(b)に示したグループG1の中の部分光学素子Aの中央からの光線は図示のように射出し、スポットシフトを起こした後、図34(a)のフライアイ・インテグレータ上の部分照明領域A'の中央に達する。この場合、部分照明領域A'の重心を ρ_{sub} 単位で表示する

と、

$$(x_{FEA}, y_{FEA}) = (-4.5 \rho_{sub}, 0.5 \rho_{sub})$$

である。従って、部分光学素子Aに関するスポットシフトは式(40)を2次元に拡張した式より、

$$(\Delta x, \Delta y) = (-4.5 \phi_{sub}, 0.5 \phi_{sub})$$

である。

【0165】同様に、図34(b)のグループG5の左端と、同図のグループG15の左端の部分光学素子についてスポットシフトを見積もると、それぞれ次式となる。

$$(\Delta x, \Delta y) = (-0.5 \phi_{sub}, 4.5 \phi_{sub})$$

$$(\Delta x, \Delta y) = (-0.5 \phi_{sub}, -4.5 \phi_{sub})$$

【0166】さらに、全ての部分光学素子のスポットシフトについて検討すると、最終的には、図34に示した部分光学素子のうち8つの部分光学素子からの光線がスポットの最外周を決定することがわかる。これより基本光学素子51の後段に生成される2次光源の $x-y$ 有効径は $24 \phi_{sub} \times 8 \phi_{sub}$ となる。このような基本光学素子51を図9のように配列した場合の光スポットの集合の最外周より、回折光学素子21の後段に生成される2次光源の x, y 方向の有効径は $24 \phi_{sub} \times 40 \phi_{sub}$ となる。

【0167】ここで、図12(a)、(b)の結像系として $x-y$ 対称系の場合を考えると、光束が遮られないためには、 ϕ_{2nd} を $40 \phi_{sub}$ としておく必要があることがわかる。このように、2次光源の有効径 ϕ_{2nd} は単純に ϕ_{DOE} (=34 ϕ_{sub})と等しくならない。

【0168】以上説明した手順により、部分光学素子の配列個数が定まったので、式(1)より ϕ_{sub} が定まる。また、 ϕ_{2nd} が定まったので、式(2)より f_L が定まる。このようにして求めた f_L 、 ρ_{sub} を式(3)に代入することによって f_{sub} を定めることができる。

【0169】そして、以上のように求めた f_L 、部分照明領域の重心座標等を式(32)～(35)に代入することによって偏向位相成分 $\rho_{dif}(x, y)$ が定まる。また、 f_{sub} を式(37)に代入することによって回転対称レンズの位相成分 $\rho(x, y)$ が定まる。さらに、これらを式(36)に代入することによって各部分光学素子の位相分布 ρ_{tot} を決定することができる。

【0170】なお、以上の説明では図12(a)、(b)と式(1)～(3)は1方向についてのみ説明したが、 x 方向と y 方向とで非対称である場合にも適用することができる。この場合には x 、 y それぞれの方向について上記と同様の関係式に基づいて検討することが好ましい。

【0171】以下に具体的な数値例を示す。本実施形態の具体的な数値例は基本的に第1実施形態の数値例と同様である。回折光学素子21は、図34(b)及び図9に示したように34個×34個の部分光学素子から構成されている場合を考える。また、光学系の全長、露光領域

の制限等を考慮して、上記式(13)と同様の値を用いる。

【0172】

【数41】

$$(13) \quad \phi_{DOE} = 40 \text{ mm}$$

$$\phi_{FE} = 4 \text{ mm}$$

$$f_{FE} = 20 \text{ mm}$$

【0173】また、 $\rho_{sub} = \phi_{FE}$ 、 $\phi_{3rd} = \phi_{FE}$ とする。まず、式(1)に ϕ_{DOE} と $k = 34$ を代入し、部分光学素子50の有効径 ϕ_{sub} を得る。

【0174】

【数42】

$$(14) \quad \phi_{sub} = \phi_{DOE} / k = 1.176 \text{ mm}$$

ϕ_{sub} が定まったので2次光源の有効径 ϕ_{2nd} が定まる。図34(b)、図9の配列の場合は、既に検討したように、

【0175】

【数43】

$$(15) \quad \phi_{2nd} = 40 \phi_{sub} = 47.059 \text{ mm}$$

である。次に式(2)の右辺に上記で求めた値を代入し f_L を得る。

【0176】

【数44】

$$(16) \quad f_L = \phi_{2nd} / \phi_{3rd} \cdot f_{FE}$$

$$= 235.294 \text{ mm}$$

また、式(3)より f_{sub} が得られる。

【0177】

【数45】

$$(17) \quad f_{sub} = f_L \cdot \phi_{sub} / \rho_{sub}$$

$$= 69.204 \text{ mm}$$

【0178】そして、所望の部分照明領域の重心座標(x_{FEA} 、 y_{FEA})、波長 λ 、回折光学素子の基盤屈折率 n を式(32)～(39)の組に代入することによって、前記部分照明領域を照明するための部分光学素子50の表面形状 $h(x, y)$ を定めることができる。

【0179】上記手順を必要な部分照明領域の全てに対して行なうことによって対応する部分光学素子の表面形状を全て定めることができる。このようにして定めた複数の部分光学素子50を図34(b)のように配列したものが基本光学素子51のパターンとなる。さらに、基本光学素子51を図9のように配列したものが回折光学素子21全体のパターンとなる。このパターンに従つて、電子線マスクをEB描画し、レジストを塗布したガラス基板に転写し、パターンをエッチングすることによって回折光学素子21を製造することができる。

【0180】また、本実施形態における、インテグレート効果、空間コヒーレンス、及び収差補正に関しては、第1実施形態と同様であるので、その説明は省略する。

【0181】(第5実施形態)本実施形態は、回折光学素子により通常の円形照明を行うものである。図1にお

いて、モータMT1によりレボルバ3を回転し本実施形態にかかる回折光学素子を光路中へ挿入し、モータMT2によりレボルバ7を回転して開口絞り35を選択する。基本的な設定は第2実施形態と同様である。本実施形態で特徴的な点は以下に述べる設計手順にある。第2実施形態では仮想レンズを用いて設計を行ったが、本実施形態では基本照明領域を部分照明領域に分割し、この部分照明領域をグループ分けすることで設計を行う。

【0182】図36(a)は、基本照明領域60を部分照明領域61に分割し、その部分照明領域をG1～20のグループにグループ分けした様子を示す図である。本実施形態においても部分照明領域61はフライアイ・インテグレータの要素レンズ入射面と一致させている。また、第2実施形態で説明したように、部分照明領域のグループG1～G20と部分光学素子のグループG1～G20とは相似形となる。

【0183】そして、図36(b)に示すように、部分照明領域61のグループG1～G20を照明するための部分光学素子62のグループG1～G20を10列×2行の形に稠密に配列したものが新たな基本光学素子63となる。ここで、図36(b)の各グループG1～G20内の部分光学素子の配列と、同図(a)の部分照明領域のグループG1～G20内の対応する部分照明領域の配列とは、180°回転した関係になっている。最後に、この基本光学素子63をy方向に20個繰り返し配列することによって全体で40個×40個の部分光学素子の正方領域の新たな回折光学素子が形成される。

【0184】以下に具体的な数値例を示す。本実施形態の具体的な数値例は基本的に第2実施形態の数値例と同様である。本実施形態は、第2実施形態においてレボルバを回転させた状態なので、 ϕ_{DOE} 、 ϕ_{FE} 、 f_{FE} は第2実施形態と同じ値である。また、 $\rho_{sub} = \phi_{FE}$ 、 $\phi_{3rd} = \phi_{FE}$ とする。まず式(1)に ϕ_{DOE} と $k = 40$ を代入し、部分光学素子62の有効径 ϕ_{sub} を得る。

【0185】

【数46】

$$(18) \quad \phi_{sub} = \phi_{DOE} / k = 1.000 \text{ mm}$$

ϕ_{sub} が定まったので2次光源の有効径 ϕ_{2nd} が定まる。 ϕ_{2nd} は第1実施形態の場合と同様に、部分光学素子の配列の場合に関して以下の結果を得る。

【0186】

【数47】

$$(19) \quad \phi_{2nd} = 46 \phi_{sub} = 46.000 \text{ mm}$$

次に式(2)の右辺に上記で求めた値を代入し、 f_L を得る。

【0187】

【数48】

$$(20) \quad f_L = \phi_{2nd} / \phi_{3rd} \cdot f_{FE}$$

$$= 230.000 \text{ mm}$$

式(3)より、 f_{sub} を求める。

【0188】

【数49】

$$(21) \quad f_{\text{sub}} = f_L \cdot \phi_{\text{su}} b / \rho_{\text{sub}}$$

$$= 57.500 \text{ mm}$$

【0189】以上のごとく算出した数値と、所望の部分照明領域の重心座標 (x_{FEA} 、 y_{FEA})、波長 λ 、回折光学素子の基盤屈折率 n を式 (32) ~ (39) の組に代入することによって、前記部分照明領域を照明するための部分光学素子 62 の表面形状 $h(x, y)$ を定めることができる。

【0190】上述の手順を必要な部分照明領域の全てに対して行なうことにより対応する部分光学素子の表面形状を全て定めることができる。このようにして定めた複数の部分光学素子を図 36 (b) のように配列したものが基本光学素子 63 のパターンとなる。そして、さらに基本光学素子 63 を y 方向に 20 個配列したものが回折光学素子 22 の全体のパターンとなる。このパターンに従って、電子線マスクを EB 描画し、レジストを塗布したガラス基板に転写し、パターンをエッチングすることによって回折光学素子 22 を製造することができる。

【0191】また、第 2 実施形態と同様に、照明方法を変更すると 2 次光源面の有効径 $\phi 2nd$ が変化するので、充填率を一定の値に維持する場合はリレーレンズの焦点距離 f_L が変化する。従って、リレーレンズは焦点距離が可変な構成とすることが望ましい。例えば、第 5 実施形態ではリレーレンズを構成するレンズ素子を光軸方向に移動すること、又は焦点距離の異なる他のレンズ素子をリレーレンズ内に挿脱すること（単に挿脱する場合の他、置換する場合を含む）で第 4 実施形態と異なる配置にすることによって焦点距離 f_L を変更している。

【0192】また、同様の理由により、第 5 実施形態と第 4 実施形態とでは部分光学素子の焦点距離 f_{sub} が異なっている。従って、回折光学素子は焦点距離の相違を加味してレボルバーに設置する事が望ましい。例えば、第 4 実施形態と第 5 実施形態とでリレーレンズの焦点面を一定とし、焦点距離のみ変化した場合には、部分光学素子の焦点距離 f_{sub} のずれ量だけ回折光学素子の z 方向の位置をずらして配置する必要がある。具体的には、第 5 実施形態における部分光学素子の焦点距離 f_{sub} は、第 4 実施形態における部分光学素子の焦点距離 f_{sub} よりも 11.704 mm 短くなっている。従って、第 5 実施形態の回折光学素子は第 4 実施形態の回折光学素子 21 よりもフライアイ・インテグレータ側に 11.704 mm シフトした位置に配置することが望ましい。

【0193】ここで、リレーレンズの焦点面と焦点距離とを同時に変更する構成とすることもできる。そして、第 4 実施形態と第 5 実施形態との部分光学素子の焦点距離 f_{sub} のずれ分を吸収するようにリレーレンズの焦点面位置を設定することができる。この場合には、本実

施形態にかかる回折光学素子 22 と回折光学素子 21 の z 方向の位置は同じにすることができる。なお、充填率を一定としない場合は、光束がケラれない範囲でリレーレンズの焦点距離 f_L を一定とすることもできる。

【0194】また、照明系の収差補正に関しても、第 2 実施形態と同様の手順で行なうことができる。なお、充填率を光束がケラれない範囲に設定し、かつ収差補正をしない場合には照明方法を変更しても焦点距離 f_L 、 f_{sub} を一定とすることもできる。この場合、回折光学素子を配置する位置は固定されていて良い。

【0195】さらに、本実施形態の場合のインテグレート効果、空間的コヒーレンスも第 2 実施形態の場合と同様であるので、その説明は省略する。

【0196】(第 6 実施形態) 第 6 実施形態は、本発明をスキャン露光機に適用したものである。基本的な設定は第 3 実施形態と同様である。本実施形態で特徴的な点は以下に述べる設計手順にある。第 3 実施形態では仮想レンズを用いて設計を行ったが、本実施形態では基本照明領域を部分照明領域に分割し、この部分照明領域をグループ分けすることで設計を行う。スキャン露光機の構成及び回折光学素子が輪帯照明を行う点については第 3 実施形態と同様であるので、重複する説明は省略する。

【0197】図 37 (a) は、基本照明領域 70 を部分照明領域 71 に分割し、その部分照明領域を G1 ~ G26 のグループにグループ分けした様子を示す図である。本実施形態においても、部分照明領域 71 はフライアイ・インテグレータの要素レンズ入射面と一致させている。また、第 1 実施形態で説明したように、部分照明領域 71 のグループ G1 ~ G26 と部分光学素子 72 のグループ G1 ~ G26 とは相似形となっている。

【0198】次に、図 37 (b) のように、上記手順に基づいて部分照明領域 71 のグループ G1 ~ G26 を照明するための部分光学素子 72 のグループ 1 ~ 26 を 3×4 列 \times 2 行の形に稠密に配列する。これが新たな基本光学素子 73 となる。ここで、図 37 (b) の各グループ G1 ~ G20 内の部分光学素子の配列と、図 37 (a) の部分照明領域のグループ G1 ~ G26 内の対応する部分照明領域の配列とは、 180° 回転した関係になっている。そして、この新たな基本光学素子 73 を y 方向に 17 個繰り返し配列することによって回折光学素子を構成する。 $x - y$ 方向における部分光学素子数は 34×34 個となる。

【0199】図 23 は本第 6 実施例の回折光学素子の全体図である。同図では基本光学素子 73 を y 方向に 17 個配列することによって回折光学素子を構成している。 $x - y$ 方向に関する部分光学素子数は 34×34 個となっている。なお、部分光学素子 72 は、フライアイ要素レンズに対応して長方形となっているので、全有効径も長方形となる。従って、回折光学素子への入射ビームもほぼ同じ大きさの長方形に整形しておくことが望ましい。

い。

【0200】以下、具体的な数値例を示す。本実施形態の具体的数値例は基本的に第3実施形態の数値例と同様である。まず、回折光学素子の配列は図37(b)、図26に示すように配列されており、34個×34個の部分光学素子から構成されている場合を考える。また、光学系の全長、露光領域の制限から以下の値が定まっているものとする。

【0201】

【数50】

$$(22) \quad \phi_{DOE_x} = 40 \text{ mm}$$

$$\phi_{DOE_y} = 20 \text{ mm}$$

$$\phi_{FE_x} = 8 \text{ mm}$$

$$\phi_{FE_y} = 4 \text{ mm}$$

$$f_{FE} = 20 \text{ mm}$$

$$\text{また、} \rho_{sub_x} = \phi_{FE_x},$$

$$\rho_{sub_y} = \phi_{FE_y},$$

$$\phi_{3rd_x} = \phi_{FE_x},$$

$$\phi_{3rd_y} = \phi_{FE_y},$$

とそれぞれする。

【0202】まず、式(1)に ϕ_{DOE_x} , ϕ_{DOE_y} と $k = 34$ を代入し、部分光学素子72の有効径 ϕ_{sub_x} , ϕ_{sub_y} を得る。

【0203】

【数51】

$$(23) \quad \phi_{sub_x} = \phi_{DOE_x} / k_x$$

$$= 40 \text{ mm} / 34$$

$$= 1.176 \text{ mm}$$

$$(24) \quad \phi_{sub_y} = \phi_{DOE_y} / k_y$$

$$= 20 \text{ mm} / 34$$

$$= 0.588 \text{ mm}$$

【0209】そして、上述のように算出した数値と、所望の部分照明領域の重心座標(x_{FEA} , y_{FEA})、波長 λ 、回折光学素子の基盤屈折率 n を式(32)～(39)の組に代入することによって、前記部分照明領域を照明するための部分光学素子72の表面形状 $h(x, y)$ を定めることができる。

【0210】かかる手順を必要な部分照明領域の全てに対して行なうことによって、対応する部分光学素子の表面形状を全て定めることができる。このようにして定めた複数の部分光学素子72を図37(b)のように配列したものが基本光学素子73のパターンとなる。さらに、図26に示すように、基本光学素子73を y 方向に17個繰返し配列したものが回折光学素子の全体のパターンとなる。このパターンに従って、電子線マスクをEB描画し、レジストを塗布したガラス基板に転写し、パターンをエッチングすることによって回折光学素子を製造することができる。

【0211】また、本実施形態のインテグレート効果、空間的コヒーレンスに関しては、第3実施形態と同様であるので、その説明は省略する。

$$\phi_{sub_y} = \phi_{DOE_y} / k_y$$

$$= 20 \text{ mm} / 34$$

$$= 0.588 \text{ mm}$$

【0204】ここで、 ϕ_{sub} が定まったので2次光源の有効径 ϕ_{2nd_x} , ϕ_{2nd_y} が定まる。 ϕ_{2nd} は第4実施形態の場合と同様に、上述の部分光学素子の配列に関して検討することができる。

【0205】

【数52】

$$(25) \quad \phi_{2nd_x} = 26 \cdot \phi_{sub_x}$$

$$= 30.588 \text{ mm}$$

$$\phi_{2nd_y} = 44 \cdot \phi_{sub_y}$$

$$= 25.882 \text{ mm}$$

【0206】以上のように、 ϕ_{2nd_x} は ϕ_{2nd_y} より大きいが、フライアイ要素レンズの x y 有効径比が2:1であることと、前段に配置するリレーレンズが回転対称レンズであることを考えると、3次光源において光束がケラレないためには、 y 方向の値によって f_L を定める必要があることが理解される。従って、式

(2) の右辺に ϕ_{2nd_y} , ϕ_{3rd_y} , f_{FF} を代入し、 f_L を得る。

【0207】

【数53】

$$(26) \quad f_L = \phi_{2nd_y} / \phi_{3rd_y} \cdot f_{FF}$$

$$= 129.412 \text{ mm}$$

また、式(3)より、 f_{sub} を求める。

【0208】

【数54】

【0212】また、第3乃至第6実施形態は、例えば、回折光学素子として基板の片面にレンズ成分と偏向成分とを有する1次元グレイティングを施したもの説明したが、本発明はこれに限られない。その代表的な変形例として、以下の(A)～(E)に示す場合を掲げることができる。なお、ここで、回折光学素子をDOE、マイクロレンズアレーをMLAと呼ぶ。

(A) 基板の片面に第3～第6実施形態の部分光学素子と同様の作用をするMLAを形成する場合：

(B) 基板の光源側の面にDOE、他方の面にDOEを形成する場合：

(C) 基板の光源側の面にMLA、他方の面にDOEを形成する場合：

(D) 基板の光源側の面にDOE、他方の面にMLAを形成する場合：

(E) 基板の光源側の面にMLA、他方の面にMLAを形成する場合

なお、(B)から(E)の例については光源側の面に形成するDOEまたはMLAをレンズ成分、他方の面に形成するDOEまたはMLAを偏向成分とすることが望ま

しい。またさらに、他の変形例として、基板の片面に第1～第3実施形態の部分光学素子と同様の作用をするM-LAを形成する場合も可能である。

【0213】以上、輪帯照明の場合の回折光学素子について説明してきたが、輪帯照明以外の場合についても上記と同様の手順で回折光学素子を構成することができる。ただし、照明形態を変化させると、第1又は第2実施形態のように、リレーレンズの焦点距離 f_L と部分光学素子の焦点距離 f_{sub} が変化する場合がある。従って、リレーレンズは焦点距離が可変な構成であることが望ましい。また、各回折光学素子は、リレーレンズの焦点面位置と部分光学素子の焦点距離とに応じたレボルバ内の z 方向（光軸方向）位置に設置することが望ましい。

【0214】以下、光ホモジナイザーに関する第7から第11実施形態について説明する。

（第7実施形態）光ホモジナイザーは図3に示したように、基本光学素子40を行列状に配列することによって構成することができる。第7実施形態は基本光学素子40に工夫を加えることによって各種ノイズパターンによって発生する照明不均一を低減するものである。図38は第7実施形態の原理図である。図38では基本素子Aと基本素子Bからの光束がフライアイ・インテグレータを重複的に照明している。同図では基本素子Aによる強度分布を実線、基本素子Bによる強度分布を点線で示している。各強度分布は同図のごとく回折等の影響によるノイズパターンを含んだものとなる。そこで、図38に示すように、基本素子AとBがフライアイ・インテグレータ6上に作る照明領域の位置が少しずれるように、基本素子AとBをあらかじめ設計しておく。その際、ずらし量をノイズパターンの山と谷が互いに埋め合う関係にしておくことによって基本素子AとBによる合成強度分布の均一性を向上することができる。ここで、図38は1次元の場合の説明であるが、ノイズパターンが2次元的に発生している場合には、例えば図39のように複数の照明領域A～Dをx,y方向に2次元的にずらして配置することが望ましい。

【0215】ここで、ずらし量の算出は、図38の構成において基本素子Aの強度分布を波動光学的シミュレーションし、フライアイ・インテグレータ上での強度パターンを求めることによって行うことができる。また簡略した見積もりとしては、従来行われているエッジのフレル回折強度分布を用いることもできる。なお、実際に試作を行うと製造誤差に起因するノイズパターンが重複することもあるので、その強度分布を測定し、所望のノイズパターンを打ち消すように基本素子の照明領域の位置を再設計することが望ましい。例えば基本素子を構成する部分素子によって生成される部分照明領域の幅の1/2だけ照明領域がずれるように設計された2種類の基本素子を含んでいることが望ましい。

【0216】照明領域のずらし量の典型的な値としては数10μmから数百μm程度以上となるが、本発明のようにガラス基板上に複数の基本素子をエッティングして製造する光ホモジナイザーの場合には照明領域の位置を十分な精度でコントロールすることが可能である。また以上の説明では所謂コンベンショナル照明の場合について説明したが、輪帯照明、4極照明などの変形照明の場合についても、複数の照明領域の位置を少量ずつずらして、重複することによって同様に実施することができる。例えば基本素子を構成する部分素子によって生成される部分照明領域の幅の1/2だけ照明領域がずれるように設計された2種類の基本素子を含んでいることが望ましい。

【0217】（第8実施形態）光ホモジナイザーは図3に示したように、基本素子40を行列状に配列することによって構成することができる。第8実施形態はこの配列方法に工夫を加えることによって干渉ノイズによって発生する照明不均一を低減するものである。図40は光ホモジナイザーの配列と干渉ノイズ重複に関する関係を示している。同図のように、干渉ノイズはフライアイ・インテグレータを干渉性のある光束で照明した場合、その光束が波面分割され、ウエハ共役面において再び合成される際に発生する。干渉ノイズのピッチ P_n は、フライアイ・インテグレータのピッチを P_FE 、リレーレンズ $4'$ の焦点距離を $f_L 2$ 、使用波長を入として

【0218】

【数55】

$$(27) \quad P_n = \lambda \cdot f_L 2 / P_FE$$

で与えられる。図40では基本素子Aからの光束による干渉ノイズを実線（干渉ノイズA）、基本素子Bによる干渉ノイズを点線（干渉ノイズB）で示している。干渉ノイズAとBはフライアイ・インテグレータ上での照明光傾斜による位相差 Δ が波長の整数倍となるとき、図40のように互いに重なり、強調されてしまう。ここで位相差 Δ は基本素子AとBの光束の傾き角を θ として、

【0219】

$$【数56】 (28) \quad \Delta = P_FE \cdot \sin \theta$$

で与えられる。干渉ノイズ強調の条件は

【0220】

$$【数57】 (29) \quad \Delta = n \cdot \lambda \quad (n \text{は整数})$$

である。ここで傾き角 θ は基本素子AとBの距離 L_H とリレーレンズ4の焦点距離 $f_L 1$ によって決まることがわかる。以下では一例としてリレーレンズ4が $f \cdot \sin \theta$ 型のレンズの場合を考える。この場合 $\sin \theta$ は次式で与えられる。

【0221】

$$【数58】 (30) \quad \sin \theta = L_H / f_L 1$$

ここで(28), (30)式より Δ / λ を計算すると次式となる。

【0222】

【数59】

$$(31) \quad \Delta/\lambda = L_H \cdot P_FE / (fL1 \cdot \lambda) \\ = L_H / P_FT$$

【0223】なお、式(31)では $P_FT = fL1 \cdot \lambda / P_FE$ なる関係式を用いて式を整理した。 P_FT はフライアイ・インテグレータの周期パターンをリレーレンズ4によって光学的フーリエ変換したパターンのピッチに対応する。式(29)より、式(31)の右辺が整数となる場合に干渉ノイズが強調しあうことが理解される。しかし、 L_H を上手く選ぶことによって干渉ノイズを低減することが可能である。以下では、基本素子間の距離 L_H を光ホモジナイザーの最周辺にある素子($m=1$ とする)から測定するものとする。この場合 m 番目の基本素子と最周辺の基本素子の距離 L_H は次式で与えられる。

【0224】

$$(34) \quad \Delta/\lambda = (m-1) \cdot k + (m-1) \cdot (\phi/P_FT)$$

式(34)で第一項 $(m-1) \cdot k$ は必ず整数となるので、位相差を考える場合無視してもよい。結局式(34)の第二項だけを考えればよい。この項を見ることによって干渉ノイズを効率よく低減するには、

【0227】

【数63】

$$(35) \quad \phi/P_FT = 1/m_{max}$$

であればよいことがわかる。これを式(34)に代入し、第一項を無視して次式を得る。

【0228】

【数64】

$$(36) \quad \Delta/\lambda = (m-1) / m_{max}$$

一例として基本素子数 m_{max} が4の場合を考えると
【0229】

【数65】

(37) $\Delta/\lambda = 0, 1/4, 2/4, 3/4$ となる。この場合4つの基本素子による干渉ノイズの位相が徐々にシフトし、丁度基本周期 P_n を等間隔で充填することがわかる。この様子は図41のように示される。実際に式(35)より ϕ を定め、さらに式(33)より P_H を求める数値例を示す。まず、基本パラメー

$$(41) \quad P_H = k \cdot 24.8 \mu m + 1.24 \mu m$$

k として適当な数値40を選ぶと、

【0234】

【数70】(42) $P_H = 993.24 \mu m$ となる。典型的な値としては上記のようになるが、本発明のようにガラス基板上に複数の基本素子をエッチングして製造する光ホモジナイザーの場合には、そのピッチ P_H を十分な精度でコントロールすることが可能であり、上記方法を実施することができる。このようなピッチの光ホモジナイザーを製造することによって干渉ノイズの影響を効率よく低減することができる。従来技術のごとく第1フライアイとする場合には位相差は要素レン

【数60】(32) $L_H = (m-1) \cdot P_H$
($m=1, 2, \dots, m_{max}$) ここで P_H は光ホモジナイザーの着目する方向の基本素子ピッチ、 m_{max} はその方向に存在する基本素子数である。さらに P_H は任意の整数 k と任意の実数 ϕ によって一般に次式で与えることができる。

【0225】

【数61】

$$(33) \quad P_H = k \cdot P_FT + \phi$$

式(32)、(33)を式(31)に代入して次式を得る。

【0226】

【数62】

$$(34) \quad \Delta/\lambda = (m-1) \cdot k + (m-1) \cdot (\phi/P_FT)$$

タとして

【0230】

【数66】

$$(38) \quad P_FE = 2 mm,$$

$$fL1 = 200 mm,$$

$$\lambda = 0.248 \mu m$$

とする。次に P_FT を求める。

【0231】

【数67】

$$(39) \quad P_FT = fL1 \cdot \lambda / P_FE$$

$$= 24.8 \mu m$$

基本素子数 m_{max} が20個の場合を考える。これと式(39)を式(35)に代入し、 ϕ を求める。

【0232】

【数68】

$$(40) \quad \phi = P_FT / m_{max}$$

$$= 1.24 \mu m$$

式(39)、(40)を式(33)に代入して次式を得る。

【0233】

【数69】

$$(41) \quad P_H = k \cdot 24.8 \mu m + 1.24 \mu m$$

ズの外径公差(10 μm 程度)で決まっており、このような規則的な位相コントロールは不可能であった。すなわち干渉ノイズの低減はランダム規則によっており、低い効率であった。

【0235】なお、光ホモジナイザーに入射する照明光束の空間的干渉性を考慮した場合、その空間的可干渉距離より基本素子ピッチ P_H が大きくなるように k を設定することが望ましい。また、以上の検討は図40の配置によらず、フライアイ・インテグレータまたは干渉ノイズの任意の方向の周期について実施することができる。その場合にはその方向の断面内について上記計算を

行えばよい。従ってフライアイ・インテグレータの内部の配列として任意の配列の場合に対応できる。また、以上に説明した内容はフライアイ・インテグレータのかわりにマイクロレンズアレイやロッドインテグレータを用いた場合でも同様に実施可能である。

【0236】(第9実施形態) 第9の実施形態はエッチングによる光ホモジナイザーの基本製造方法に関するものである。図42に光ホモジナイザーの製造原理を示す。図42では光ホモジナイザーの基本素子パターン(1つまたは複数)が描画されたレチクルRを設置し、照明光学系ILからの所望の照明光により照射し、投影レンズTLを介してフォトレジストを塗布したガラス基板G上に基本素子パターンを縮小露光し、この露光動作をガラス基板Gの位置をシフトしつつ繰り返すことによって基本素子の潜像をアレイ状に生成している。そして、潜像を現像しエッチングすることによって高精度な光ホモジナイザーを製造することができる。ここで、縮小投影露光装置としては従来のステッパー方式やスキャン・ステッパー方式のものを用いることが可能である。露光波長としてはUVやDUV, EUVを用いることが可能である。

【0237】また、レチクルは電子ビーム描画や光描画方式のものを用いることが可能である。図43は基本素子のレチクルパターン(同図A)と最終的な光ホモジナイザーの2次元配列の対応関係(同図B)を示している。図43ではレチクル上には描画された基本素子(=基本単位P0)Pがガラス基盤の有効径内に行列状に繰り返しパターニングされている。

【0238】(第10実施形態) 第10実施形態はレチクル上の基本単位として複数の基本素子を含む場合に関するものである。図44(B)はレチクル上の基本単位P0として基本素子Pを4個含む場合を示している。このレチクルを使用した場合、1回の露光によって4つの基本パターンを露光することができる。すなわち図43(B)のパターンを露光するのに、図43(A)のレチクルを使用して露光する場合に比べて露光回数を1/4に低減することができる。このため光ホモジナイザー製造のスループットが向上し、光ホモジナイザーのコストダウンが行える。図44(B)のようなレチクルの製造方法としては、電子ビーム描画によって図44(A)に示すような一つの基本素子パターンを含む元レチクル

$$(44) \quad \Delta/\lambda = (m-1) \times \delta / P_{FT} \quad (m=1, \dots, m_{max})$$

m_{max} は列の数である。式(44)見ると干渉ノイズを効率よく低減するには、

【0243】

【数73】

$$(45) \quad \delta / P_{FT} = 1 / m_{max}$$

であればよいことがわかる。すなわち、

【0244】

R'を描画しておき、これを不図示の光露光装置によつて複数露光し、パターニングする方法がある。また、別の方法として電子ビーム描画によって直接複数の基本素子パターンを描画してもよい。この場合、各基本パターンを描画する際に発生する描画誤差はそれぞれ異なり、かつ最終的には各素子は並列に使用されるので、レチクル描画誤差が相殺される効果もある。

【0239】ここで、第10実施形態は第7実施形態で述べたパターニングに適用することもできる。図45

(A)は基本単位P0として基本素子A~Dを含んでいるレチクルRである。基本素子A~Dはそれぞれ、図39の照明領域A~Dを発生するようパターニングされている。図45(B)は同図(A)のレチクルをガラス基板上に複数回転写し、パターニングして製造した光ホモジナイザーである。この光ホモジナイザーを使用することによって回折や製造誤差等による照明不均一を押さえつつ、所望の照明パターンを得ることができる。なお、光ホモジナイザーの有効径内には基本素子A~Dがそれぞれ同数だけ含まれていることが望ましい。

【0240】(第11実施形態) 第11実施形態は特定の方向の干渉ノイズを低減するためのものである。図46(A)は一例としてy方向に周期的に変化する干渉ノイズを低減する場合の例である。第11実施形態では、光ホモジナイザー内の基本パターンは異なる列(x座標が等しい基本素子の組を列とする)に関して徐々にy座標がシフトするようパターニングしてある。この配列によって、光ホモジナイザーの有効径内に少なくとも2つ以上の独立な干渉領域が存在すれば、その独立な干渉領域がウエハ(共役)面上にそれぞれ生成する干渉ノイズがy方向にシフトして重畳する。強度分布の位相シフト量は各列の座標シフトLHに比例し、次式で与えられる。

【0241】

【数71】(43) $\Delta/\lambda = L_H / P_{FT}$
ここで、 L_H は基準列である最左列から測定するものとする。また $P_{FT} = f L_1 \cdot \lambda / P_{FE}$ である。次に各列のシフトピッチを δ 、列の指標を m (最左列が $m=1$)とすると $L_H = (m-1) \times \delta$ である。これを式(43)に代入し、次式を得る。

【0242】

【数72】

【数74】

$$(46) \quad \Delta/\lambda = (m-1) / m_{max}$$

である。一例として列数 m_{max} が4の場合を考えると

【0245】

【数75】

$$(47) \quad \Delta/\lambda = 0, 1/4, 2/4, 3/4$$

となる。この場合 $m = 1$ から 4 の各列が発生する干渉ノイズの位相が徐々にシフトし、干渉ノイズを等間隔で効率良く充填することができる。式(45)を δ について解いて次式を得る。

【0246】

$$【数76】 (48) \quad \delta = P_{FT} / m_{max}$$

P_{FT} の計算値と m_{max} を式(48)に代入することによって δ を求めることができる。以下に実際の数値例を示す。基本パラメータが第8実施形態と同じく式

$$(40) \quad \delta = P_{FT} / m_{max} = 0.62 \mu m$$

典型的な値としては上記のようになるが、本発明のようにガラス基板上に複数の基本素子をエッチングして製造する光ホモジナイザーの場合には、各列のずらしピッチ δ を十分な精度でコントロールすることが可能であり、上記方法を実施することができる。このようなピッチの光ホモジナイザーを製造することによって干渉ノイズの影響を効率よく低減することができた。ここで、本第1実施形態と第10実施形態を合成した実施形態も可能である。この場合の光ホモジナイザーのパターンは図46(B)のように与えればよい。また、図46(A)や(B)の光ホモジナイザーをバーニングするためのレチカルとしてそれぞれ図47(A)又は(B)のような所望の列方向シフトをあらかじめ含んでいるレチカルを用いることが可能である。さらに、第11又は第8実施形態において、干渉ノイズを非等間隔(即ち、 k が一定ではなく、少しずつ変わる場合)で充填しても良い。その他にも本実施形態を組み合わせた多様な実施形態が可能である。

【0249】以上説明した各実施形態では、回折光学素子による二次光源面の y 方向有効径がフライアイ要素レンズの有効径を完全に充填する場合、即ち、隙間無く配列した場合について説明したが、本発明はこれに限られず、周辺散乱を防止するために多少の余裕を持たせて充填してもよい。

【0250】また、回折光学素子内の基本光学素子は長方形の基本光学素子を y 方向に繰り返し配置しているが、基本光学素子の形状は多角形でもよい。さらに、基本光学素子が常に一定の形状である必要もない。加えて、基本光学素子内の部分光学素子の配列についても上記各実施形態と異なる配置をとることもできる。また、回折光学素子は複数の基本光学素子によって構成しているが、回折光学素子に含まれる基本光学素子は1つであっても良い。この場合には基本光学素子が回折光学素子そのものとなる。

【0251】また、上記各実施形態では、部分光学素子による部分照明領域が、フライアイ・インテグレータの要素レンズに一致する場合について説明したが、部分照明領域は上記各実施形態の場合よりも、広くすること、又は狭くすることもできる。さらに、部分光学素子の形状は多角形としてもよい。また、部分光学素子は一定の

(38)の場合を考えると、 P_{FT} は式(39)と同じになる。

【0247】

$$【数77】 (39) \quad P_{FT} = 24.8 \mu m$$

列 m_{max} が40個の場合を考え、これと式(39)を式(48)に代入し、 δ を求めることができる。

【0248】

【数78】

形状である必要がない。基本光学素子と部分光学素子の形状と配列方法は回折光学素子の有効径の形状、又はフライアイの有効径の形状を加味したうえで多様な形態が可能である。なお、上述したように、収差補正をしない場合には、照明方法を変更しても回折光学素子の位置を一定とすることができます。従って、この場合は回折光学素子を保持する機構の構造を簡便にできる。

【0252】また、フライアイ・インテグレータの要素レンズ数が100個程度の場合について説明したが、要素数が1000個程度の場合についても本発明を適用できることは言うまでもない。要素数を増加させれば、絞り面の照明光の照度の均一性をより向上することができる。また、本発明は輪帯照明と通常照明の場合に限定されず、4極照明をはじめとする任意の変形照明または通常照明に適用可能である。また、以上では、照明形態(通常照明、輪帯照明、4極照明等)の切り替えは、回折光学素子と開口絞りとを同期して切り替える場合について説明したが、本発明は開口絞りが無い場合についても適用可能である。すなわち本発明では任意の照明分布を生成することができるため、各照明形態用の回折光学素子がフライアイ・インテグレータ上に生成する強度分布そのものが、各照明形態の絞りの役割を兼ねることが可能である。ただし、開口絞りを完全に無くしてしまうのではなく、ノイズ光カットのために、投影レンズの瞳面形状にほぼ対応した開口絞りを固定配置しておくことも可能である。さらに、通常の回折光学素子は製造誤差等のために回折されない0次光(直進光)を発生してしまう場合が多い。この0次光はフライアイ・インテグレータの中央要素近傍に集中し、ノイズ光となってしまう。このため照明形態によらず、フライアイ・インテグレータの中央付近(光軸付近)の領域は常に遮光されていることが望ましい。この遮光措置はフライアイ・インテグレータの入射面近傍から射出面近傍までの間の任意の位置に配置することが可能である。

【0253】以上説明した本発明の実施の形態では、オプティカルインテグレータとして、複数の光学素子を集積してなるフライアイレンズを適用したが、本発明ではフライアイレンズには限定されない。例えば、第2フライアイレンズとして、光軸方向に沿った内面反射面を有するロッド型インテグレータを配置する。そして、リレ

一光学系として、第1フライアイレンズの射出端面或いは射出面側に形成される複数の光源像とロッド型インテグレータの入射面とを共役な関係にするものを用いる。この場合において、第2オプティカルインテグレータが形成する実質的な面光源は、ロッド型インテグレータの入射端面の位置近傍に形成される複数の光源像の虚像からなる。さらに、オプティカルインテグレータとして、1つの基板平面内に複数のレンズが形成されているマイクロレンズアレイを用いても良い。なお、上記各実施形態における光源1としては、波長248nmのレーザ光を供給するKrFエキシマレーザ、波長193nmのレーザ光を供給するArFエキシマレーザ、波長157nmのレーザ光を供給するF₂エキシマレーザ、YAGレーザの高調波、又は水銀ランプのi線(波長365nm)などを用いることができる。

【0254】また、上記各実施形態の投影露光装置の用途としては、半導体製造用の露光装置に限定されること無く、例えば、角型のガラスプレートに液晶表示素子パターンを露光するための液晶用の露光装置や、薄膜磁気ヘッドを製造するための露光装置にも広く適用できる。

【0255】また、上記各実施形態の投影光学系としては、屈折型の投影光学系、反射型の投影光学系、反射屈折型の投影光学系などを適用することができ、その投影倍率は縮小倍率には限られず、等倍、拡大倍率であっても良い。このように、本発明は様々な変形例を取り得ることができる。

【0256】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、入射光束を効率良く所定の断面形状を有する光束に変換することができる。また、回折光学素子によって諸収差を補正し、通常の屈折系だけで構成される照明系に比較して格段に高い均一度を有する照明光を得ることができ。また、回折光学素子を構成する部分光学素子の配列周期を光源の空間コヒーレンス長以上となるようにして干渉ノイズを低減し、さらに、露光中を通じて残存ノイズを平均化することによって、高い照明均一度を達成できる。また、本発明によれば、高精度、高効率でかつ照明均一度の格段に高い光ホモジナイザーを製造することができる。また、光ホモジナイザーの製造において高スループット、低コストを実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】第1実施形態にかかる投影露光装置の概略構成を示す図である。

【図2】レボルバーの構成を示す図である。

【図3】回折光学素子の概念を説明する図である。

【図4】回折光学素子によるインテグレート(平滑化)原理を説明する図である。

【図5】フライアイ・インテグレータ上の照明領域を示す図である。

【図6】部分照明領域を説明する図である。

【図7】回折光学素子の表面形状決定原理を説明する図である。

【図8】仮想回折レンズの分割と再配列を説明する図である。

【図9】基本光学素子の配列を示す図である。

【図10】基本光学素子の他の配列を示す図である。

【図11】フライアイ・インテグレータ上のマージンを持たせた場合の照明領域を示す図である。

【図12】(a), (b)は部分光学素子の焦点距離を決定するための原理を説明する図である。

【図13】(a)～(c)は、回折レンズの設計原理を示す図である。

【図14】連続形状レンズとバイナリー回折レンズとの構成を示す図である。

【図15】バイナリー回折レンズの構成を示す図である。

【図16】再配列した後のバイナリー回折レンズの一部構成を示す図である。

【図17】バイナリー回折レンズにおける光線図である。

【図18】部分光学素子によって照明光学系全体の収差を補正する原理を説明する図である。

【図19】マージンが有る場合の部分照明領域を説明する図である。

【図20】レチクルブラインドによる遮光効果を説明する図である。

【図21】第2実施形態におけるフライアイ・インテグレータ上の照明領域を示す図である。

【図22】(a), (b)は、仮想回折レンズの分割と再配列を説明する図である。

【図23】第3実施形態におけるフライアイ・インテグレータ上の照明領域を示す図である。

【図24】部分照明領域を示す図である。

【図25】(a), (b)は、第3実施形態の仮想回折レンズの分割と再配列を示す図である。

【図26】基本光学素子の全体配列を示す図である。

【図27】(a)は従来技術の露光装置の概略構成、(b)はダブルフライアイレンズシステムを説明する図である。

【図28】輪帯形状の開口絞りの構成を示す図である。

【図29】4極照明用の開口絞りの構成を示す図である。

【図30】部分光学素子の設計原理を説明する図である。

【図31】(a), (b)はグレイティングを説明する図である。

【図32】1次元グレイティングの作用を説明する図である。

【図33】1次元グレイティングにより任意の2次元の位置を照明する原理を説明する図である。

【図34】(a), (b)は、第4実施形態の基本照明

領域の分割と、それに対応する部分素子の稠密配列配置を示す図である。

【図35】第4実施形態の部分光学素子がフライアイ・インテグレータを照明する原理を説明する図である。

【図36】(a), (b)は、第5実施形態の基本照明領域の分割と、それに対応する部分素子の稠密配列配置を示す図である。

【図37】(a), (b)は、第6実施形態の基本照明領域の分割と、それに対応する部分素子の稠密配列配置を示す図である。

【図38】第7実施形態の原理を説明する図である。

【図39】第7実施形態の原理図(x y面内)である。

【図40】第8実施形態の原理を説明する図である。

【図41】第8実施形態における干渉ノイズの低減原理を示す図である。

【図42】第9実施形態の概念図である。

【図43】第9実施形態におけるレチクルとそれを用いた光ホモジナイザーのバターニング規則を示す図である。

【図44】第10実施形態におけるレチクルとそれを用いた光ホモジナイザーのバターニング規則を示す図である。

【図45】第10実施形態におけるレチクルとそれを用いた光ホモジナイザーのバターニング規則を示す図である。

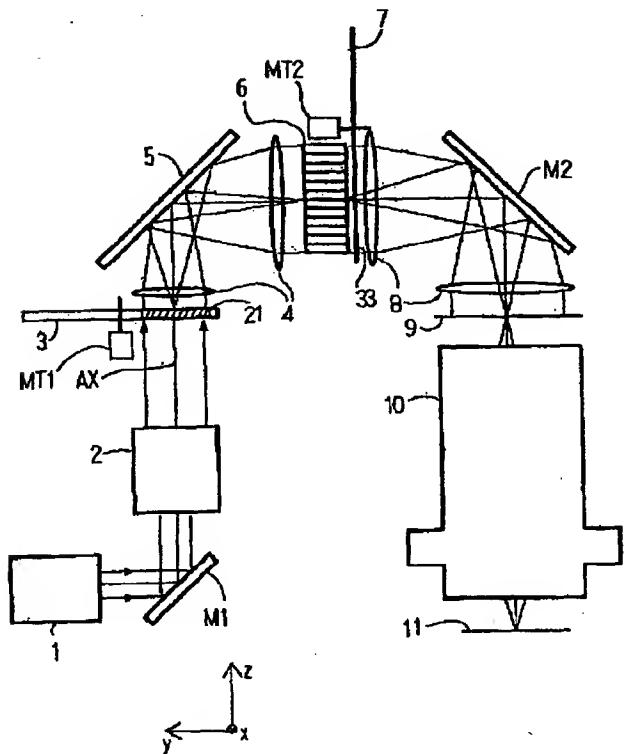
【図46】第11実施形態における光ホモジナイザーのバターニング規則を示す図である。

【図47】第11実施形態における光ホモジナイザーのレチクル原盤の例を示す図である。

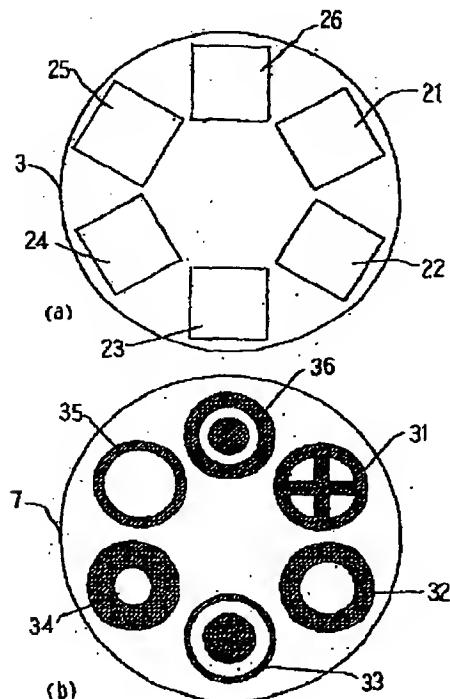
【符号の説明】

- 1 光源
- 2 ビーム整形光学系
- 3, 7 レボルバ
- 21~24 回折光学素子
- 31~36 開口絞り
- 4 リレーレンズ
- 5 振動ミラー
- 6 フライアイ・インテグレータ
- 9 レチクル
- 10 投影レンズ
- 11 ウエハ
- 50 部分光学素子
- 51 基本光学素子
- H 光ホモジナイザー

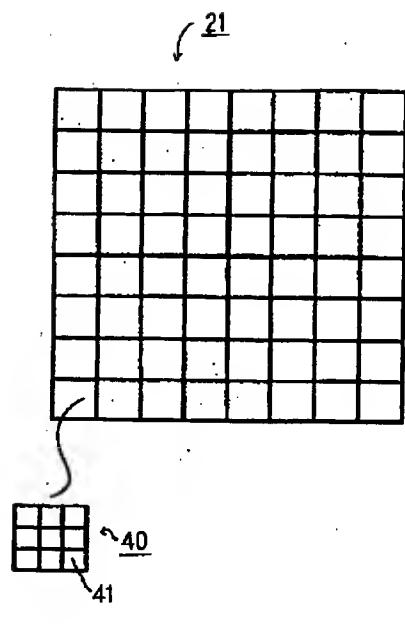
【図1】



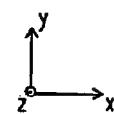
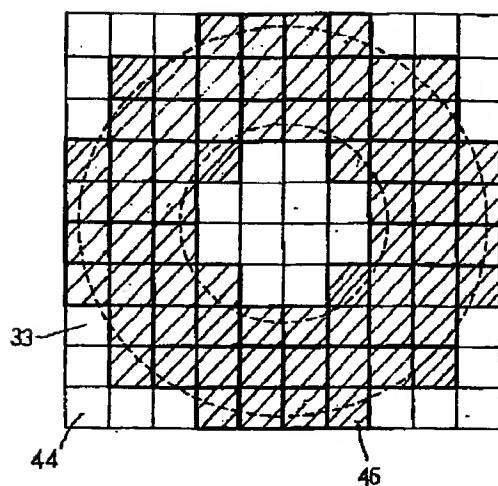
【図2】



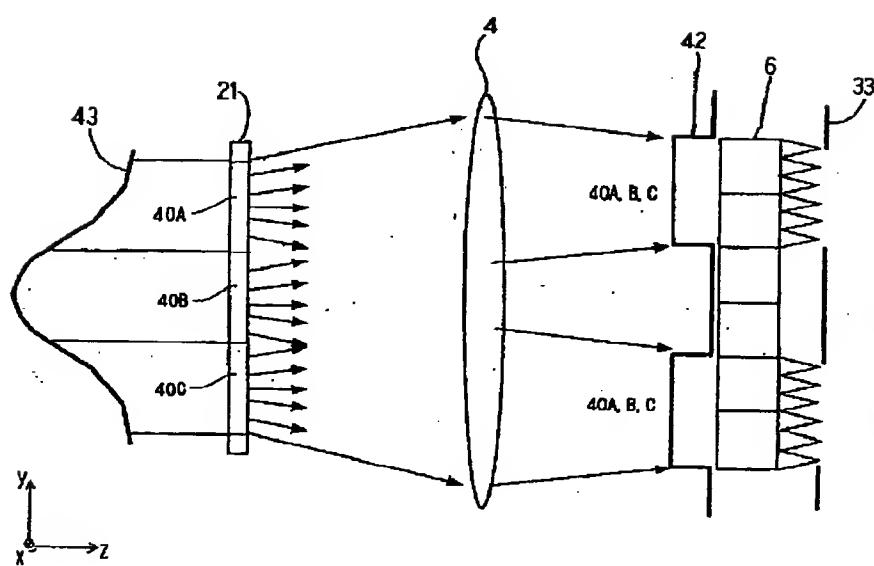
【図3】



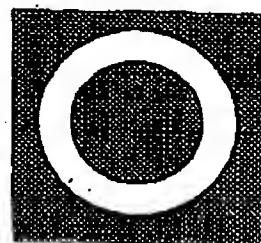
【図6】



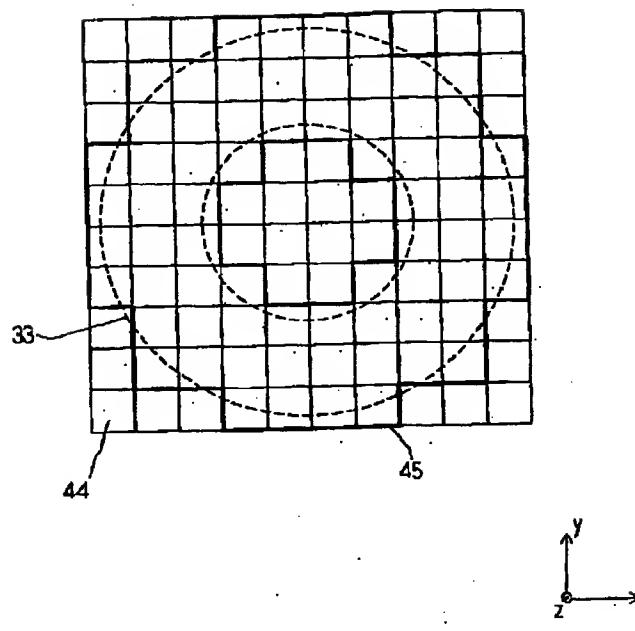
【図4】



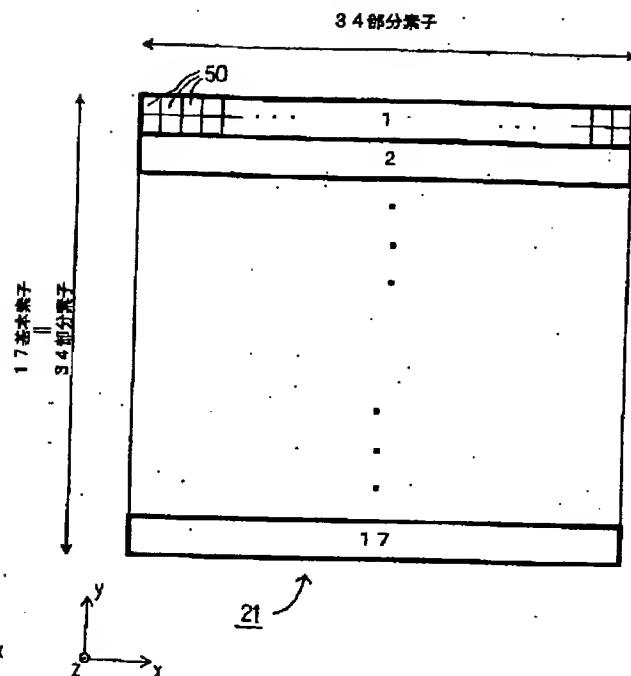
【図28】



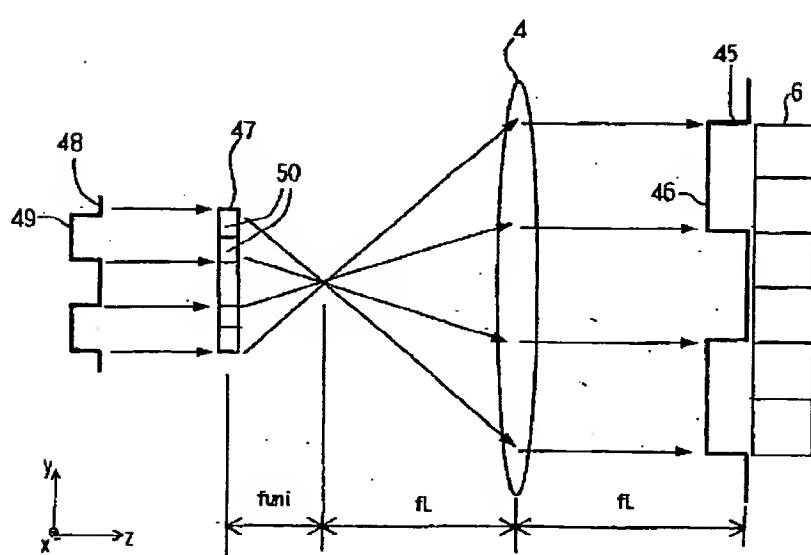
【図5】



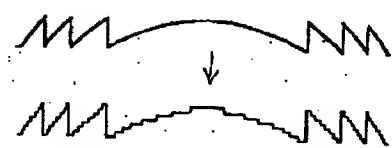
【図9】



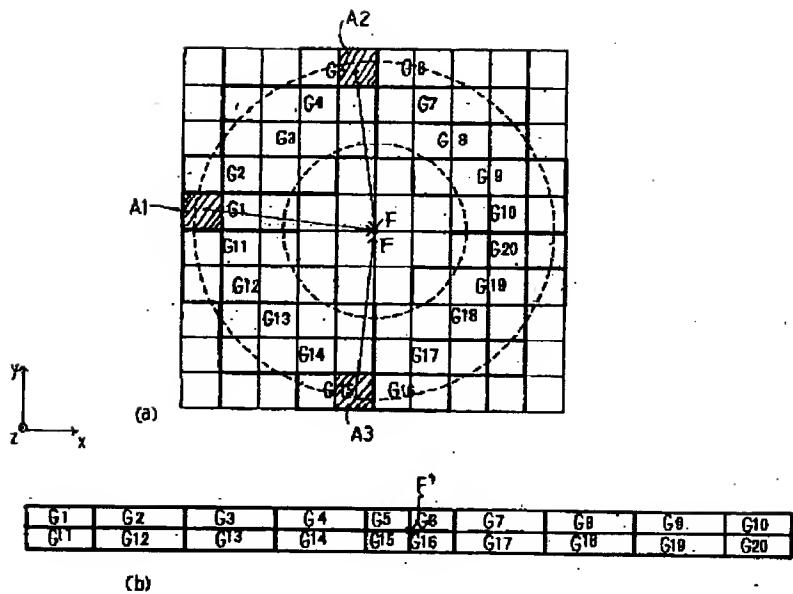
【図7】



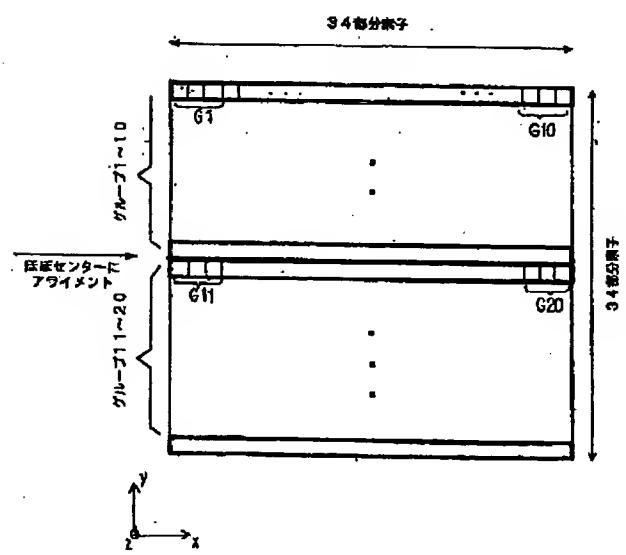
【図14】



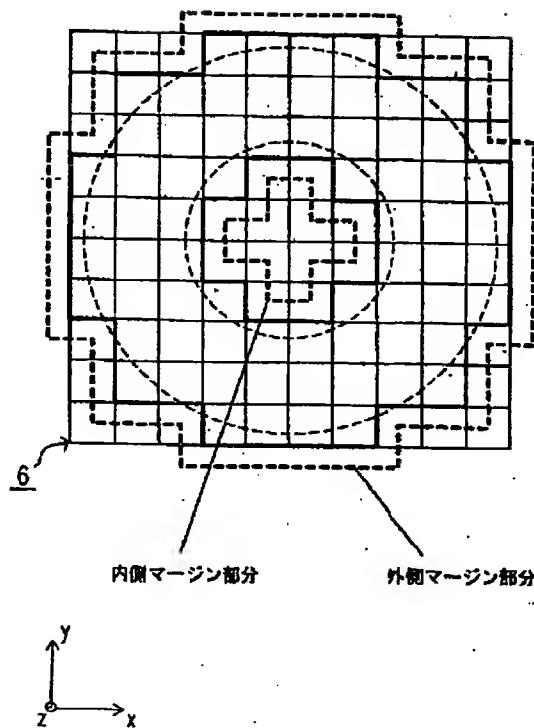
【図8】



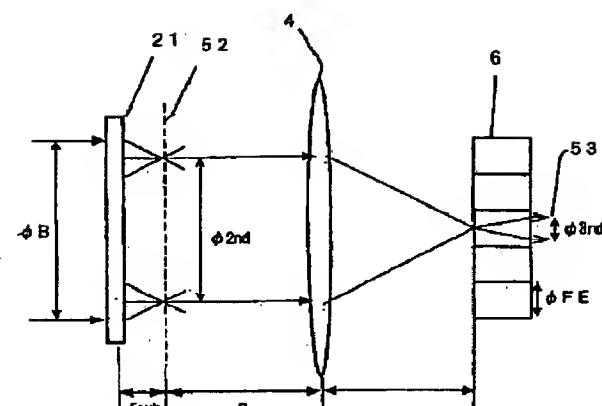
【図10】



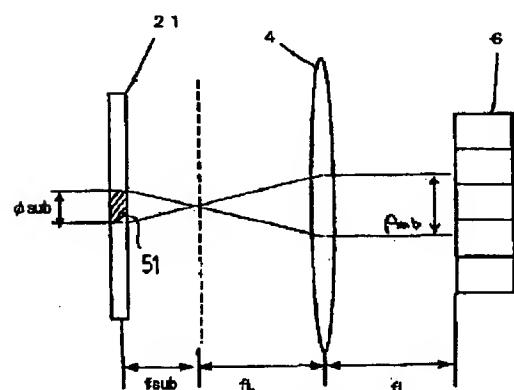
【図11】



【図12】

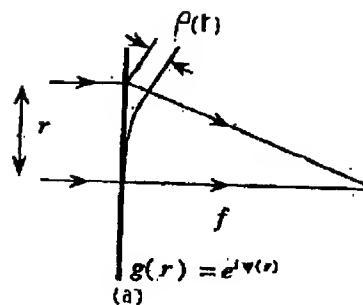


(a)

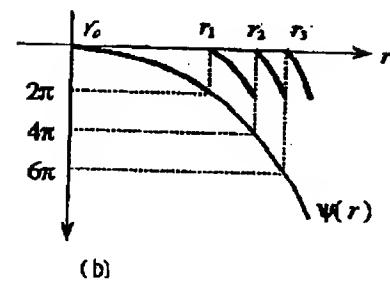


(b)

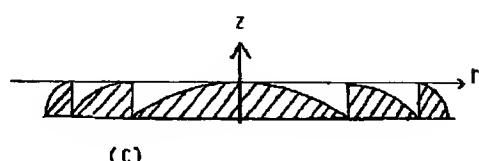
【図13】



(a)



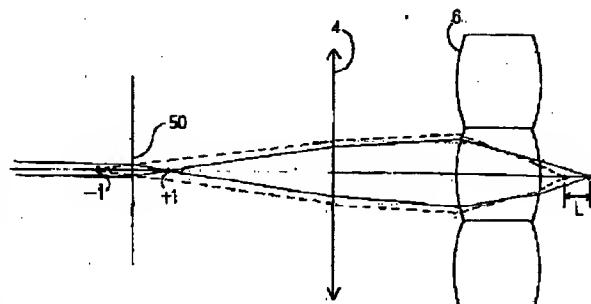
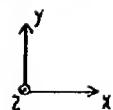
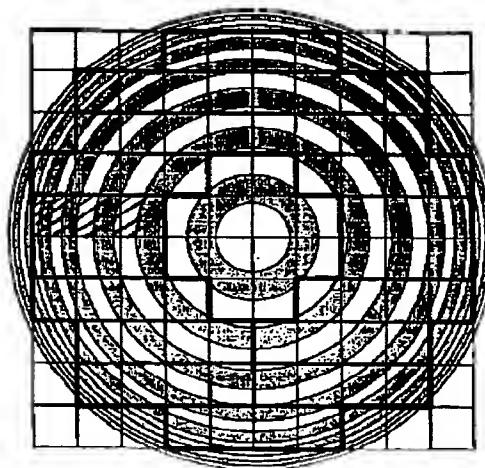
(b)



(c)

【図17】

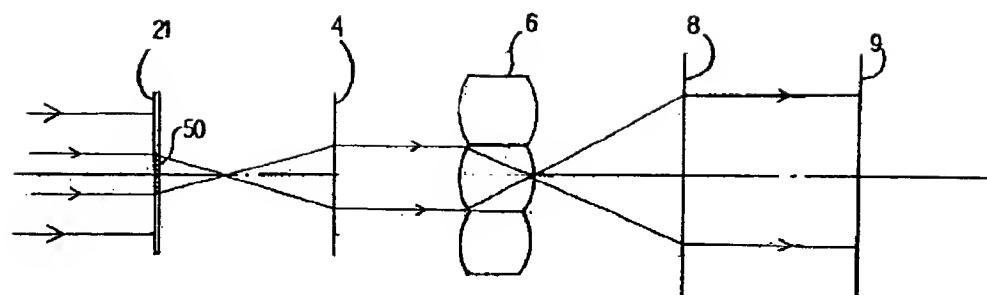
【図15】



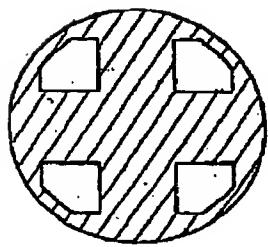
【図16】



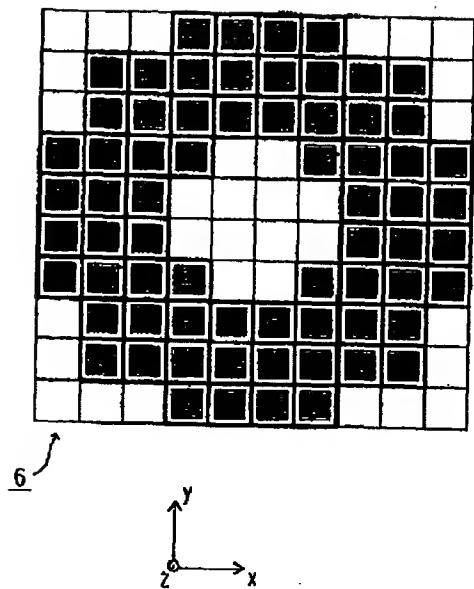
【図18】



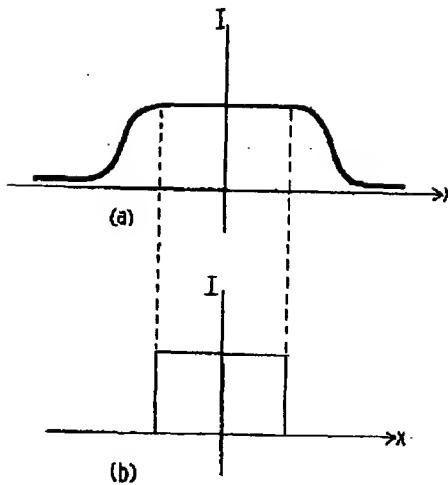
【図29】



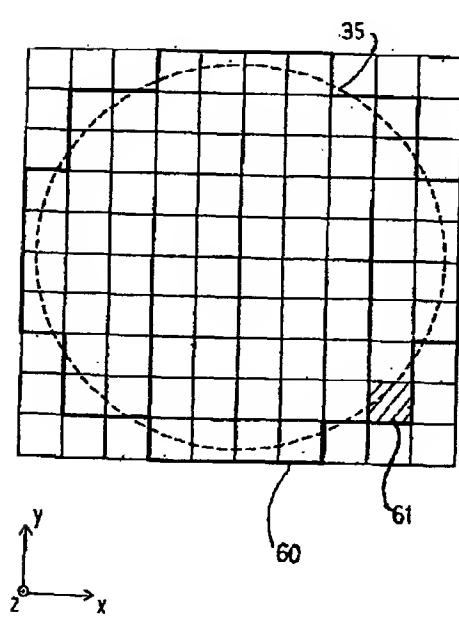
【図19】



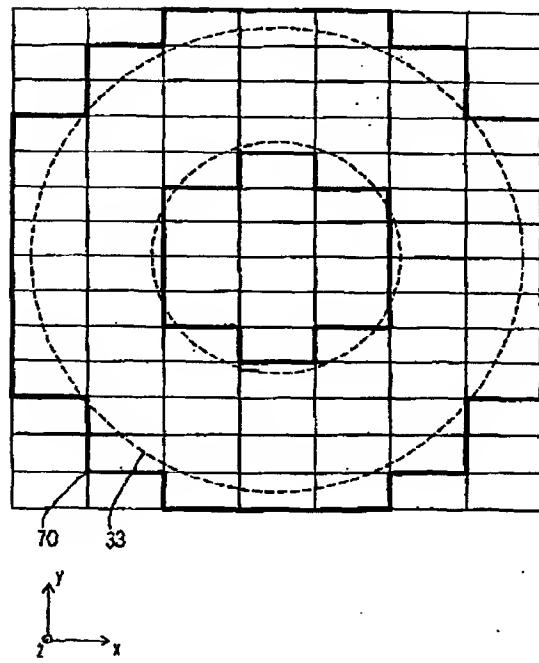
【図20】



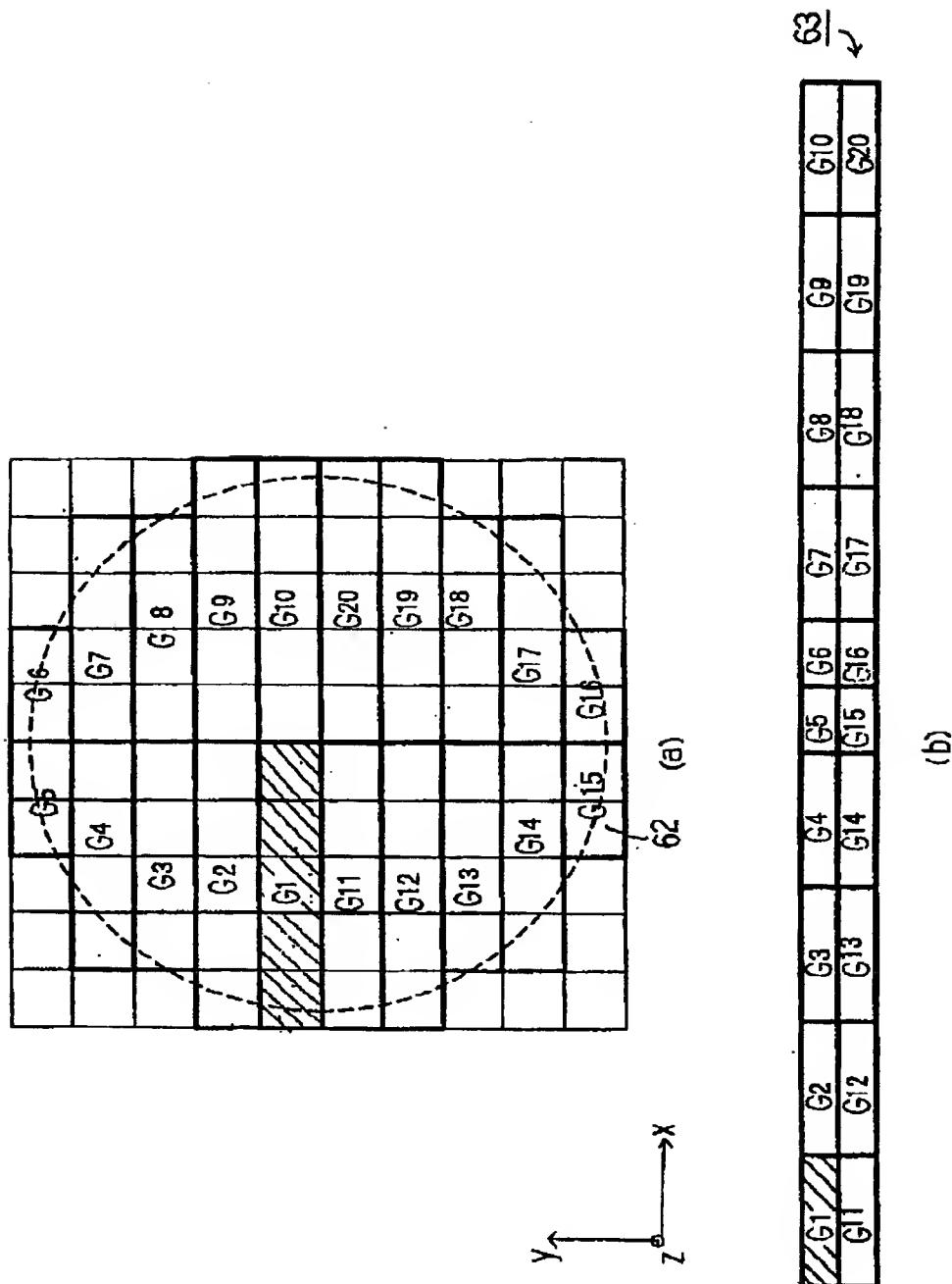
【図21】



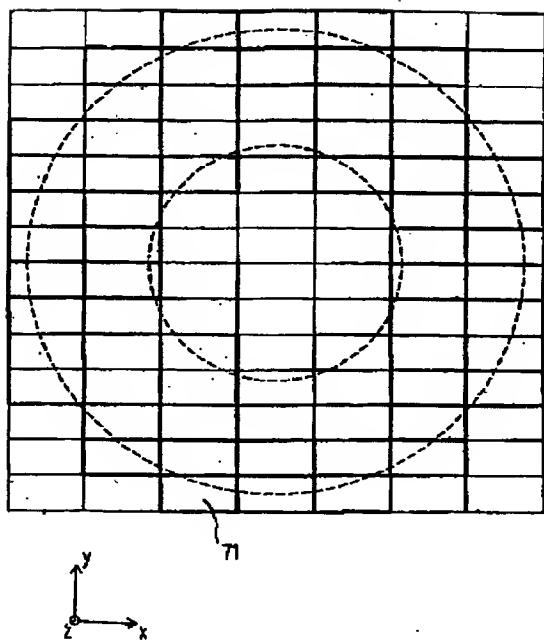
【図23】



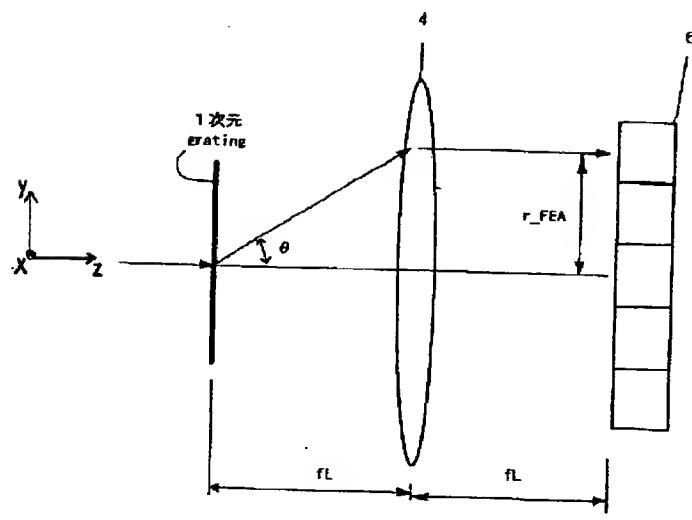
【図22】



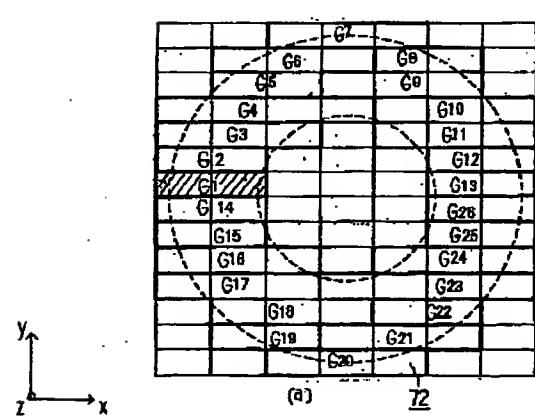
【図24】



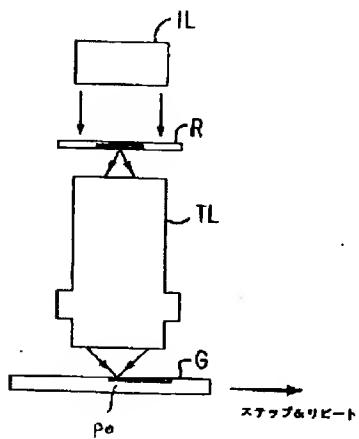
【図32】



【図25】



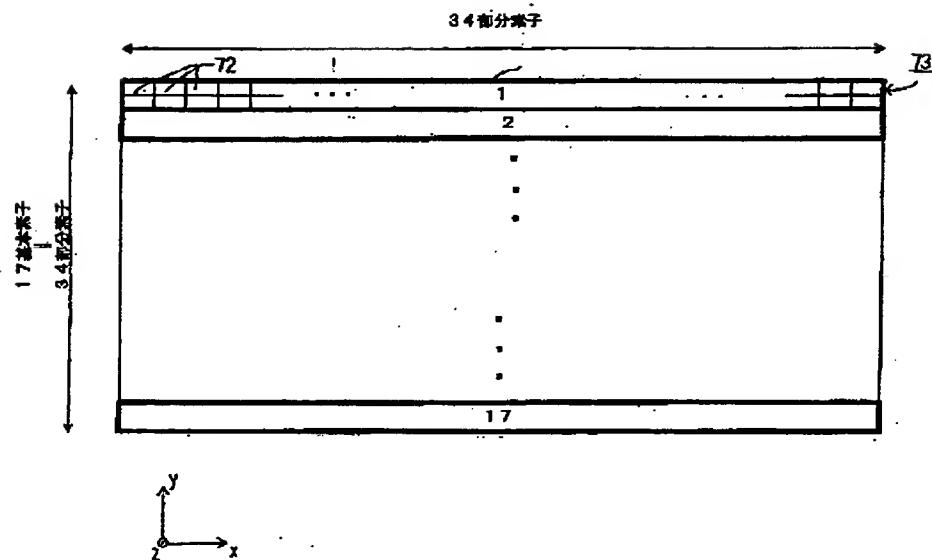
【図42】



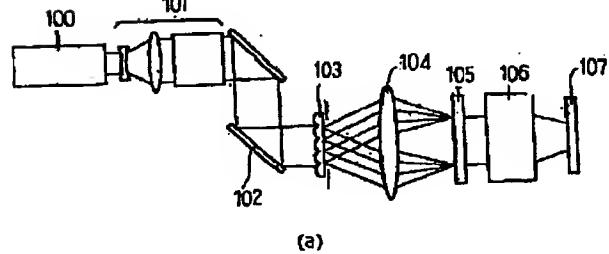
G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	73
G14	G15	G16	G17	G18	G19	G20	G21	G22	G23	G24	G25	G26	

(b)

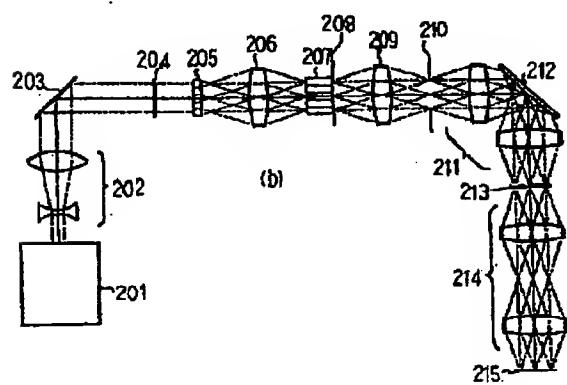
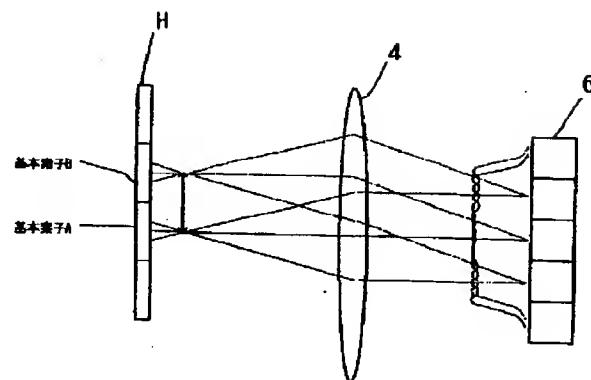
【図26】



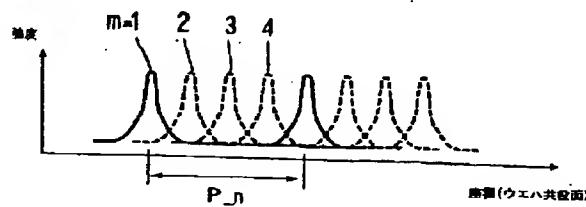
【図27】



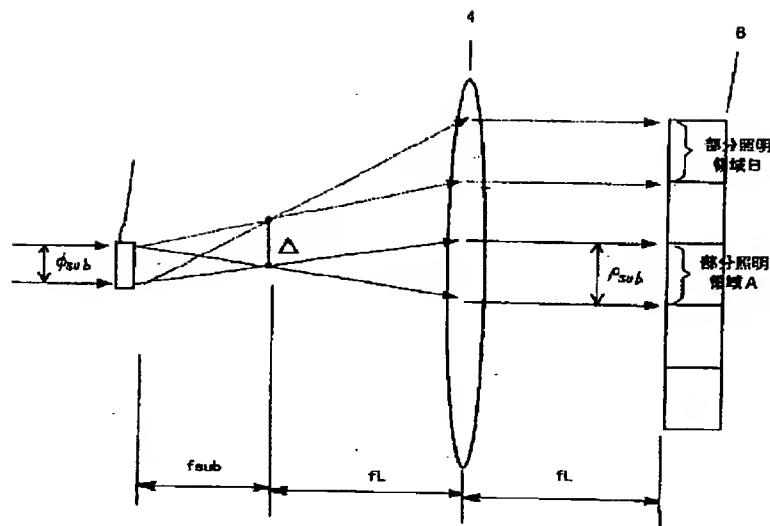
【図38】



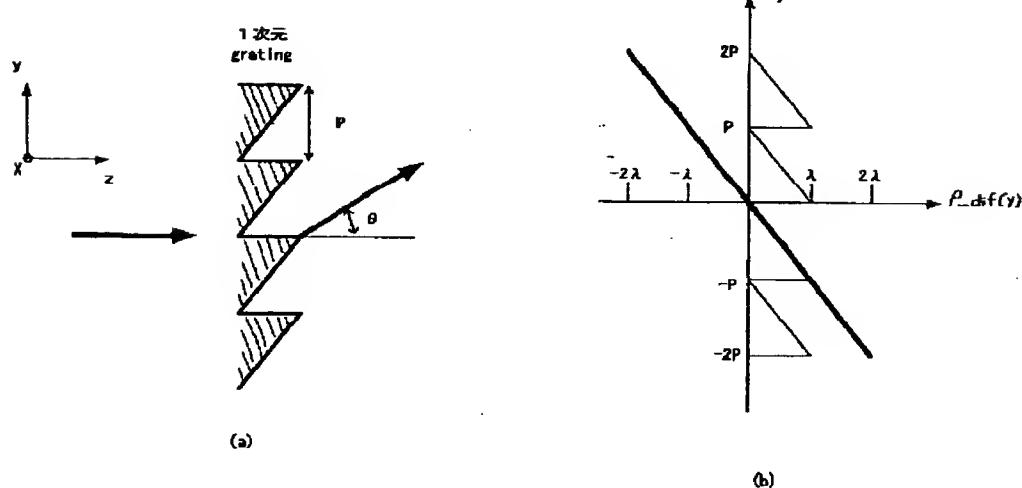
【図41】



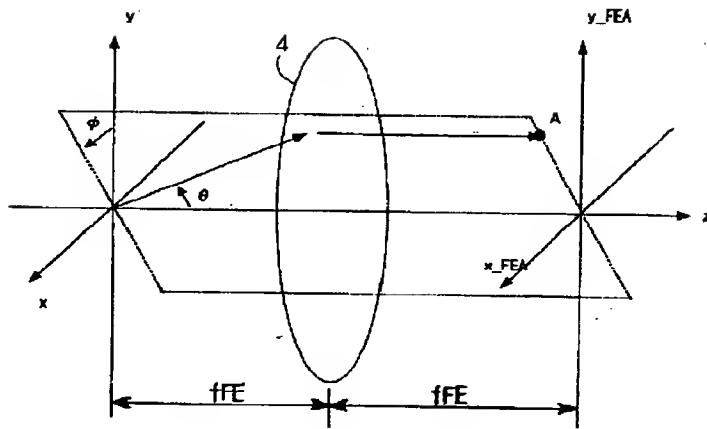
【図30】



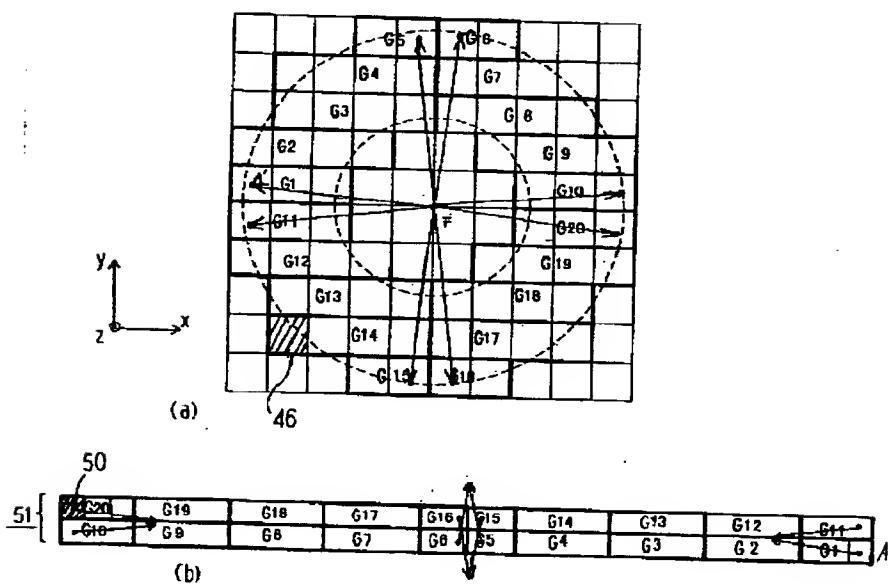
【図31】



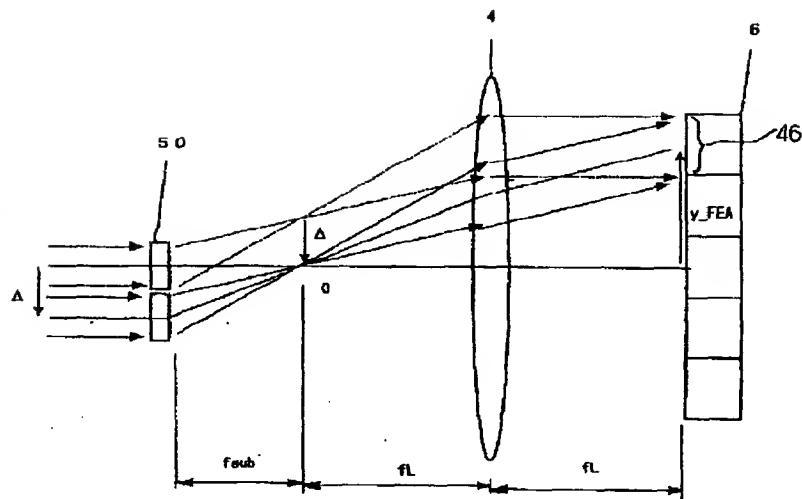
【図33】



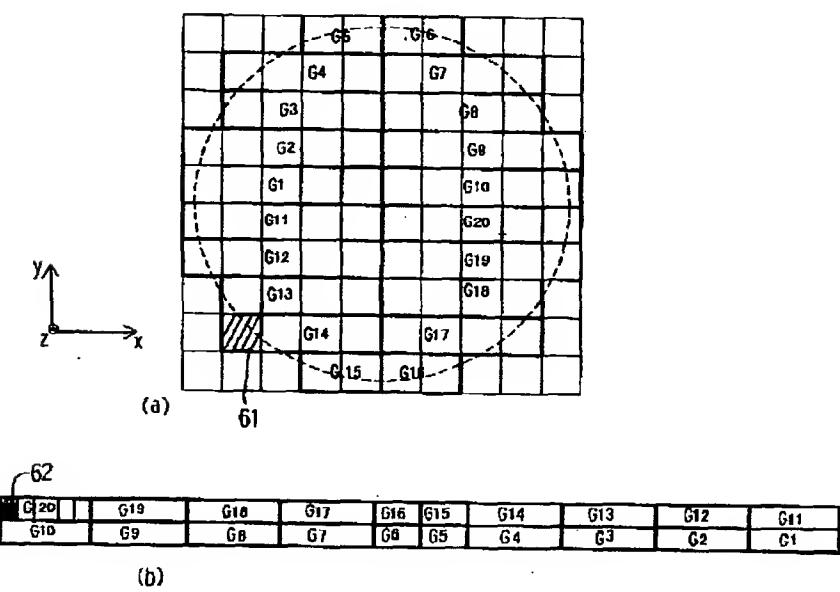
【図34】



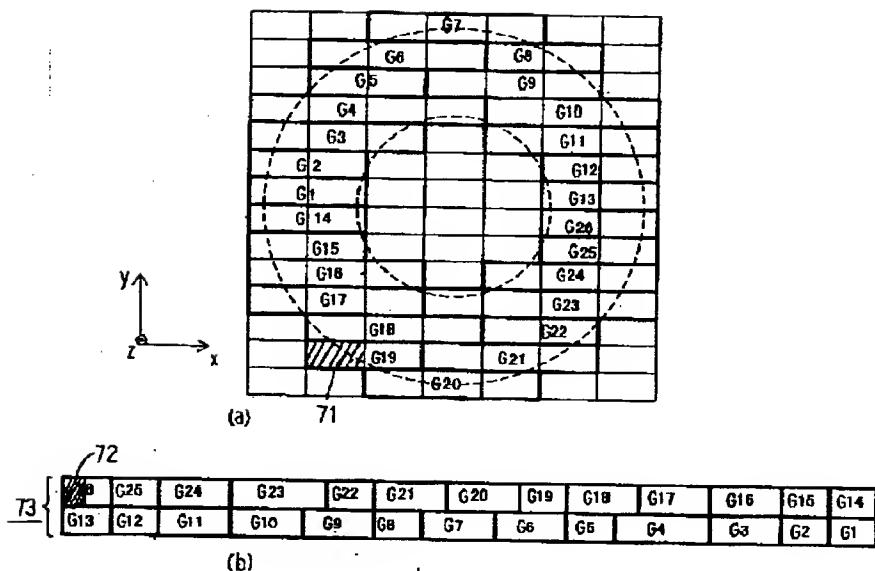
【図35】



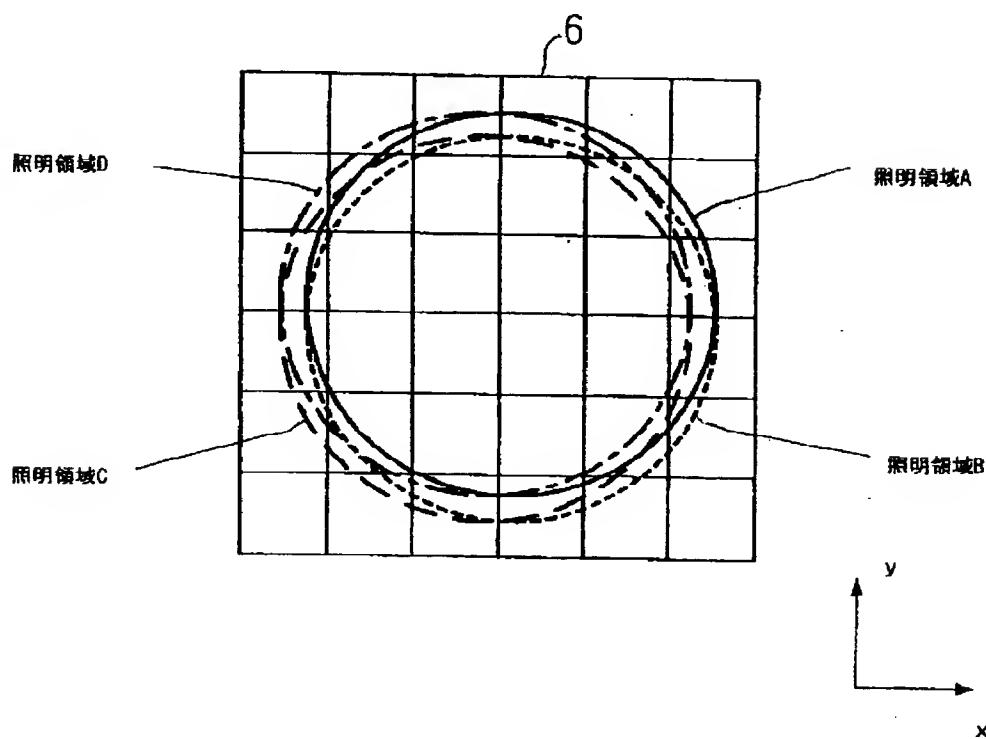
【図36】



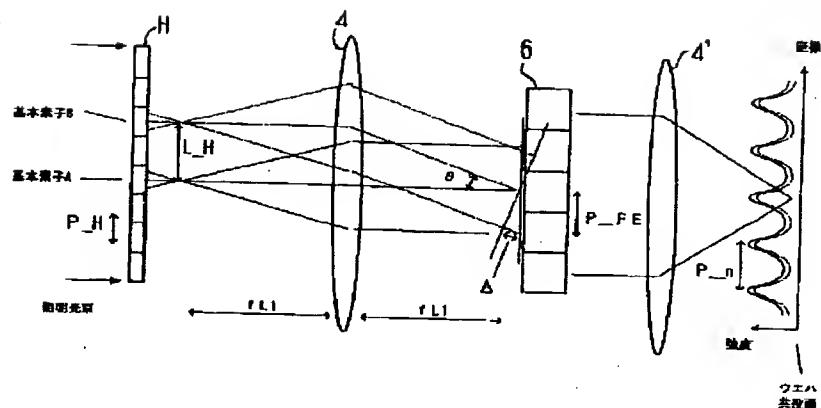
【図37】



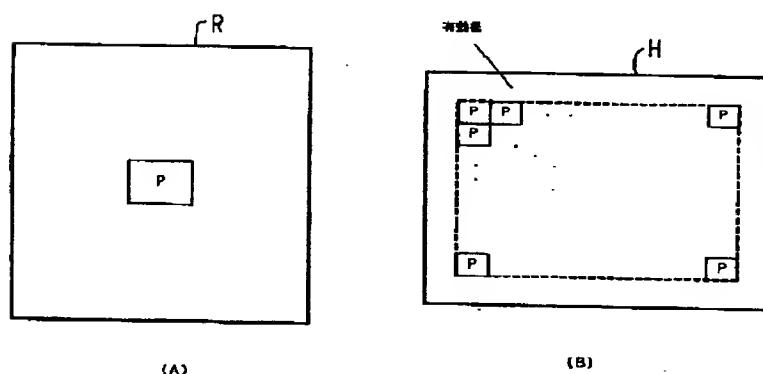
【図39】



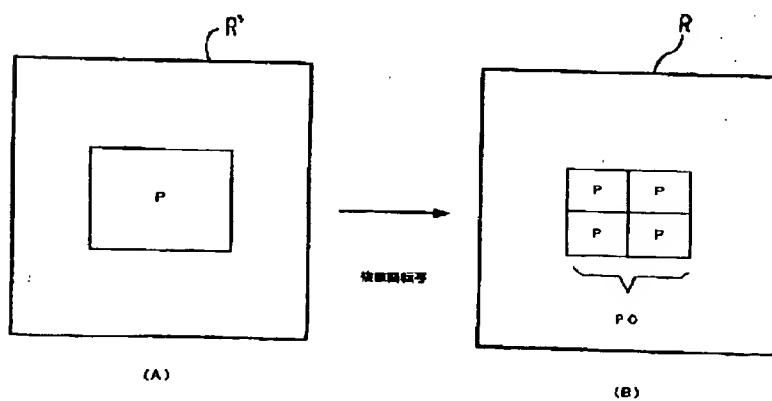
【図40】



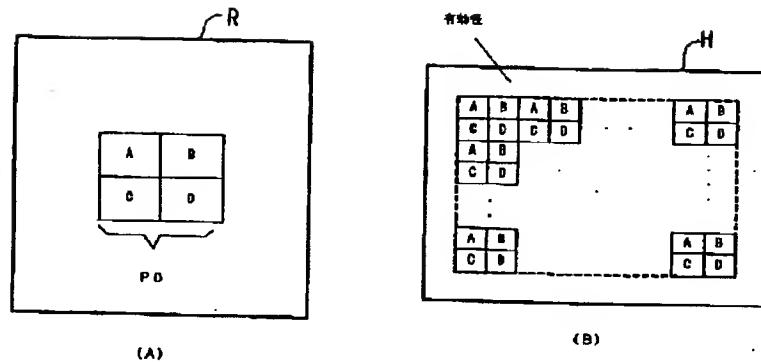
【図43】



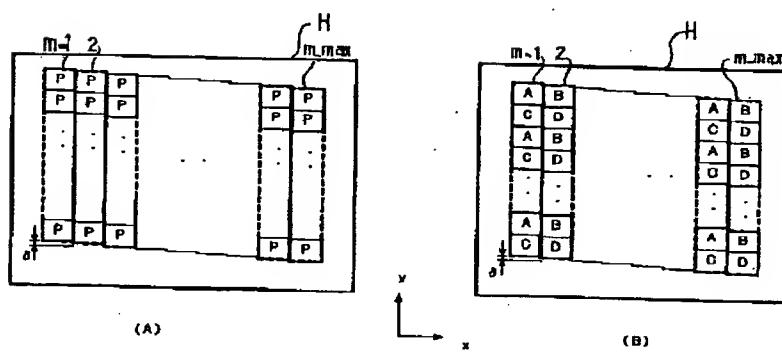
【図44】



【図45】



【図46】



【図47】

